

11474

7
291

CARACTERISTICAS Y COMPORTAMIENTO DE

LAS BARRENAS DE DIAMANTE POLICRISTALINO

1991



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

PAG.

I.	DEFINICION DEL PROBLEMA Y OBJETIVO	.....1
II.	INTRODUCCION	.....4
III.	BARRENAS DE DIAMANTE POLICRISTALINO COMPACTO (PDC)	.....10
	III.1 DESCRIPCION Y CARACTERISTICAS	.....10
	III.2 CLASIFICACION IADC	.....25
	III.3 SELECCION DE BARRENAS	.....33
	III.4 OPERACION Y EVALUACION	.....38
	III.5 APLICACIONES	.....49
	III.6 BARRENAS TSP Y BARRENAS HIBRIDAS	.....53
IV.	DESARROLLO DE UN MODELO PARA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO DE BARRENAS PDC	.....59
	IV.1 CRITERIO DE FALLA DE ROCAS Y MECANISMO DE CORTE DE CORTADORES PDC	.....59
	IV.2 FUZZAS DE INTERACCION ROCA-CORTADOR (CORTADORES NUEVOS)	.....69
	IV.3 FUZZAS DE INTERACCION ROCA-CORTADOR (CORTADORES DESGASTADOS)	.....77
	IV.4 INTEGRACION DE FUZZAS Y EVALUACION DEL DESGASTE DE LOS CORTADORES	.....79

	PAG.
V. RESULTADOS Y DISCUSION	.....82
V.1 EJEMPLO ILUSTRATIVO	.....82
V.2 EFECTO DEL PERFIL EMPLEADO	.....94
V.3 EFECTO DE LA DUREZA DE LA ROCA	.....94
V.4 EFECTO DEL DESGASTE	.....95
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	.....102
VII. NOMENCLATURA	.....105
VIII. BIBLIOGRAFIA	.....110
IX. APENDICES	.....114
A) MODELO DE RIOS J. Y GARCIA G.	.....114
B) MODELO DE FALCONER, BURGESS Y SHEPPARD	.....127
C) MODELO DE KURU Y WOJTANOWSICZ	.....140
D) MODELO DE WARREN Y SINOR	.....149

I. DEFINICION DEL PROBLEMA Y OBJETIVO

El surgimiento de las barrenas de diamante policristalino compacto PDC en la década de 1970, marcó un cambio significativo en el desarrollo de la perforación rotatoria tradicional. Estas barrenas han demostrado mayor eficiencia con relación a las barrenas tricónicas, debido a los altos ritmos de penetración y larga durabilidad que caracterizan a las barrenas PDC y que dan como resultado una perforación más económica, para el tipo de formación adecuada.

Estas barrenas de formas raras y exóticas, con múltiples chorros (jets) y con diversas posiciones de ataque en sus cortadores, han ido desplazando en forma paulatina a los tipos de barrenas convencionales para el tipo de formaciones adecuadas, logrando avances muy importantes en el desarrollo de la perforación de pozos petroleros.

En la actualidad, el empleo de las barrenas PDC se ha difundido ampliamente en la mayor parte de los países dedicados a la explotación

de hidrocarburos, apoyándose básicamente en los buenos resultados que reporta la literatura disponible.

Con frecuencia el empleo de las barrenas PDC se basa en recomendaciones de los fabricantes, los cuales tienen contacto continuo con los fabricantes de cortadores y una amplia experiencia en su empleo en operaciones de campo.

El uso de las barrenas PDC en México, dió inicio a finales de la década de 1980 en varios pozos de los distritos Frontera Noreste Sureste y Marina, en los cuales se reporta que tuvieron buenos resultados bajo las condiciones de operación indicadas por los fabricantes.

Como ya se mencionó anteriormente, en el caso de México y algunos otros países usuarios, no se cuenta con literatura que explique en forma general, los fundamentos de diseño, selección, operación, evaluación y predicción del comportamiento de las barrenas PDC, por lo que se tiene la necesidad de consultar artículos específicos del tema de interés particular. Por esto resulta de impostergable relevancia, el tratar de conjuntar un solo escrito que contenga los elementos de juicio suficientes y necesarios para poder seleccionar, operar y evaluar el comportamiento de las barrenas PDC, así como explicar en forma global los criterios y teorías que sirven de base en su diseño y evaluación.

Por lo anteriormente expuesto, el presente trabajo persigue los siguientes objetivos:

A) Resaltar los aspectos de mayor relevancia para poder llevar a cabo una buena selección de acuerdo a la columna geológica y a las condiciones de cada pozo en particular, ya que el tipo de formación marcará los límites de utilización de las barrenas, de acuerdo con la

dureza y gomosisidad de las mismas. También se incorpora un sistema de clasificación de barrenas (IADC-API) general y actualizado, adaptable a diversos tipos de barrenas. Asimismo, se adopta el sistema de evaluación propuesto por el IADC-API recientemente. Adicionalmente se describen brevemente, algunas características importantes de las barrenas PDC.

B) Desarrollar un modelo para predecir el comportamiento de barrenas PDC, que toma en cuenta los esfuerzos de interacción roca-cortador, la fricción ejercida en la misma interfase, los mecanismos de falla de rocas y algunos otros aspectos que se presentan en el desarrollo del modelo.

II. INTRODUCCION

Las barrenas usadas en perforación rotatoria comúnmente se clasifican de acuerdo a su diseño, en barrenas de fricción y barrenas de roles (tricónicas). Todas las barrenas de fricción consisten de componentes cortadores fijos, que son parte integral del cuerpo de la barrena y rotan como una sola unidad con la sarta de perforación. El uso de este tipo de barrenas, se introdujo en los procesos de perforación rotatoria en el siglo XIX. Las barrenas de roles tienen dos o más conos (generalmente tres), con elementos cortadores que rotan alrededor de los ejes de los conos una vez puesta en rotación la barrena en el fondo del agujero. La primer barrena de roles fue introducida por Hughes en 1908.

BARRENAS DE FRICCIÓN. Los aspectos de diseño de las barrenas de fricción incluyen: número y forma de los elementos de corte o piedras, el tamaño y localización de las vías o cursos de agua y la metalurgia de la barrena y los elementos cortadores. Este tipo de

barrenas incluyen: barrenas PDC de aletas de pescado (Figura 1), barrenas de diamante (Figura 2) y barrenas de diamante policristalino, que en lo sucesivo se denominarán barrenas " PDC " (Figura 3), etc. Una de las ventajas de las barrenas de fricción sobre las barrenas de roles, es que no poseen partes móviles que requieran limpieza de la superficie de los asientos y ejes, como las barrenas tricónicas. Además, como las barrenas de fricción se hacen de una sola pieza sólida de acero, tienen menor oportunidad de romperse, reduciendo con esto la posibilidad de dejar chatarra en el fondo del agujero, evitando los viajes adicionales para limpieza y consecuentemente pérdida de tiempo, que dan como resultado un mayor costo del pozo.

Las barrenas de fricción con elementos cortadores de acero o PDC, tales como las barrenas de aletas, han trabajado relativamente mejor, en relación a otros tipos de barrenas, en formaciones suaves y poco consolidadas. Cuando las formaciones se vuelven más duras y abrasivas, la velocidad de desgaste de la barrena se incrementa rápidamente y el ritmo de penetración disminuye. Este problema puede reducirse cambiando la forma del elemento cortador y reduciendo el ángulo con el cual intersecta el fondo del agujero. Por otro lado, en formaciones suaves que tienden a ser gomosas, los cortadores pueden atascarse reduciendo su efectividad. Este problema puede reducirse colocando un chorro (jet), de tal manera que el fluido golpee la parte superior de la aleta.

Las barrenas de diamante tienen un desempeño relativamente mejor en relación a otro tipo de barrenas en formaciones duras sin fragilidad que tienen un modo de falla plástico, para las condiciones de esfuerzos presentes en el fondo del agujero¹. La barrena consiste de una cara o

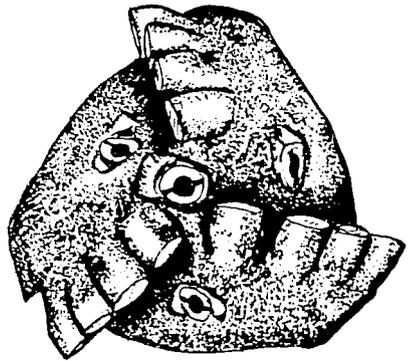


FIGURA-1

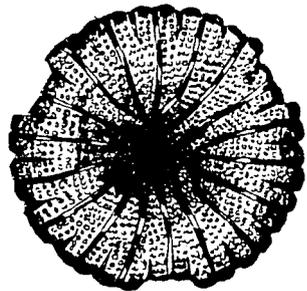
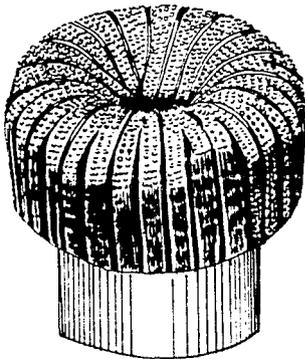


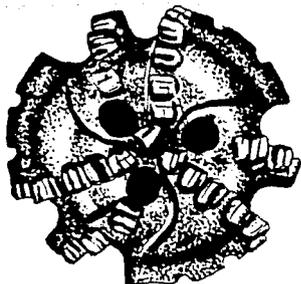
FIGURA-2

corona con muchos diamantes colocados en una matriz de carburo de tungsteno. Siguiendo las propiedades de operación de la barrena, únicamente los diamantes se ponen en contacto con el fondo del agujero, dejando un pequeño claro entre la matriz y el fondo. Los cursos de agua dirigen el flujo de fluido de perforación sobre la cara de la barrena, de tal manera que estos cursos deben ser de tamaño pequeño para forzar el flujo de fluido entre la matriz y el fondo del agujero, logrando con esto, la limpieza y enfriamiento de los diamantes.

Un aspecto importante de diseño de la barrena de diamantes, es la forma o perfil de la corona (Figura 4). Una barrena con el cono alargado es recomendable para agujeros rectos en los cuales se utilizan altos pesos sobre barrena; por otro lado, una barrena de cono corto es más fácil de limpiar, porque la energía hidráulica disponible se puede concentrar sobre una menor área. Una barrena de cara más cóncava puede usarse en operaciones de perforación direccional, ayudando a incrementar el ángulo de desviación en el agujero.

El tamaño y número de diamantes usados en una barrena de diamantes, depende de la dureza de la formación a ser perforada. Las barrenas para formaciones duras tienen piedras muy pequeñas (0.07 - 0.125 quilates), mientras que las barrenas para formaciones suaves tienen piedras un poco más largas (0.75 - 2 quilates). Algunos ejemplos de barrenas de diamante para formaciones duras se ilustran en la Figura 2.

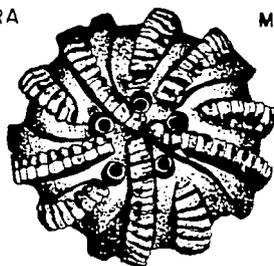
Las barrenas de diamante han sido diseñadas para operar a un gasto y una caída de presión a través de la cara de la propia barrena. Algunos experimentos realizados por fabricantes, indican que se requieren aproximadamente entre 2 y 2.5 HP/pg² en la cara de barrena.



LIGERA



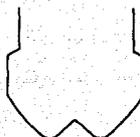
MEDIANA



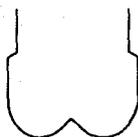
PESADA
FIGURA 3



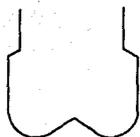
TIPO ESCALONADO



CONICIDAD LARGA



CONICIDAD CORTA



SIN CONICIDAD

FIGURA 4

con aproximadamente 500 a 1000 lb/pg² de caída de presión, para limpiar y enfriar el diamante adecuadamente. La caída de presión a través de la cara de la barrena a un gasto dado, puede ser establecida como la diferencia entre la presión de bombeo medida lejos del fondo y la presión de bombeo medida durante la perforación. Los fabricantes generalmente proporcionan la estimación del gasto requerido para establecer la caída de presión necesaria en la cara de la barrena.

En los párrafos anteriores, se han descrito algunas de las características más importantes de las barrenas, haciendo énfasis en las barrenas de fricción, dentro de las cuales están agrupadas las barrenas de diamante policristalino compacto. Estas últimas barrenas serán el tema central del presente escrito, en el que se tratarán los tópicos más importantes relacionados con ellas, tales como: características, selección, mecanismos de perforación, desarrollo de un modelo de predicción, etc., que sirvan como elementos de apoyo para una mejor utilización de las mismas.

III. BARRENAS DE DIAMANTE POLICRISTALINO COMPACTO (PDC)

III.1 DESCRIPCION Y CARACTERISTICAS

A mediados de los años de 1970, surgió una nueva familia de barrenas que hizo posible la introducción de los diamantes sintéticos policristalinos, utilizados como elementos cortadores. Estas barrenas consisten de un lecho de diamantes sintéticos policristalinos de alrededor de 0.5 mm. de espesor, que se incrustan en un cementante de carburo de tungsteno con espesor promedio de 2.5 mm., por medio de un proceso de alta presión y alta temperatura³ (Figura 5). Los planos de fractura de los cristales del diamante tienen una orientación fortuita, que previene cualquier rompimiento inducido por algún cristal individual y la propagación a través de todo el cortador. La Figura 6 ilustra un diamante sintético policristalino compacto, que puede insertarse en una matriz de carburo de tungsteno (cuerpo de la barrena), o en un botón de carburo de tungsteno que se monta a su vez en un cuerpo de barrena de acero.

ESTRUCTURA DEL DIAMANTE COMPACTO

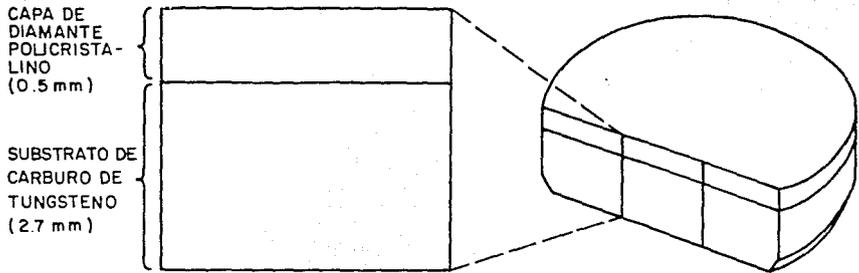


FIGURA 5

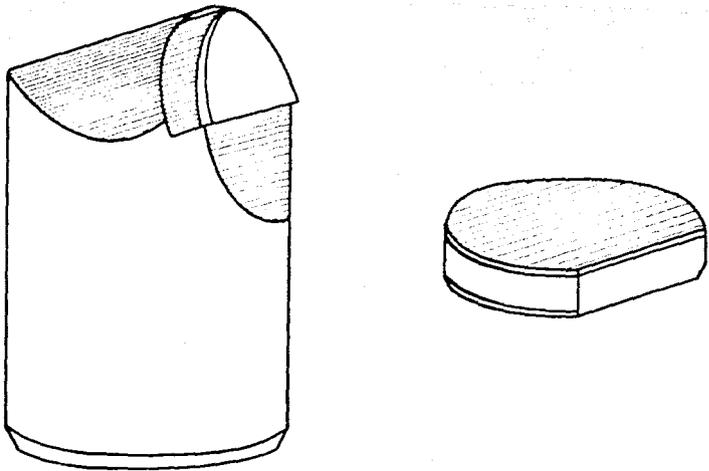


FIGURA 6

Las barrenas PDC han tenido un rápido desarrollo. El mejor desempeño de estas barrenas se tiene en formaciones suaves, firmes y medio duras, con características no abrasivas ni gomosas. En la literatura se reportan los buenos resultados que se obtienen empleando barrenas PDC, al perforar secciones uniformes de carbonatos y evaporitas. Del mismo modo, estas barrenas se han usado satisfactoriamente en areniscas y arcillas. Aunque el embolamiento de la barrena representa un serio problema en formaciones suaves y gomosas, también los recortes abrasivos y quebradizos lo son en formaciones duras y abrasivas. En estos casos la hidráulica de la barrena, juega un papel muy importante para reducir el embolamiento.

La forma o perfil de la corona, es también un factor de diseño importante en las barrenas PDC. Resumiendo los perfiles de doble conicidad usados en las barrenas de diamante, perfiles de conicidad sencilla, perfiles de varias conicidades y perfiles de fondo plano se usan igualmente en barrenas PDC. La acción de limpieza hidráulica, usualmente se lleva a cabo usando los chorros (jets) para enfriar el cuerpo y los cursos de agua para lubricar y enfriar los cortadores y la matriz.

Otros aspectos importantes en el diseño de las barrenas PDC son:

- a) El tamaño, forma y número de cortadores usados,
- b) El ángulo de ataque entre el cortador y la superficie expuesta de la formación, el cual se define por el ángulo formado por el plano de la parte frontal del cortador con respecto a la vertical, tal como lo ilustra la Figura 7. Es muy común emplear el término de ángulo de ataque negativo, refiriéndose expresamente a que el cortador guarda una posición angular con direccionamiento hacia la formación, volviéndose más agresivo cuando el ángulo de ataque es cero grados, esto es cuando el

cortador se coloca en posición perpendicular a la superficie de la formación, esto último se ilustra con claridad en la Figura 8. c) La orientación del cortador en el cuerpo de la barrena, se define por el ángulo que forma el plano de ataque del cortador con respecto al eje transversal de la barrena, tal como lo ilustra la Figura 9.

CORTADORES DE DIAMANTE POLICRISTALINO COMPACTO.

Muchas características de las barrenas PDC se orientan al análisis de los cortadores PDC, los cuales se han venido usando en los campos petroleros durante aproximadamente 15 años. El desarrollo de los cortadores PDC esta apoyado principalmente en los fabricantes de los mismos, para los cuales, el empleo en el campo petrolero es solamente una de las muchas aplicaciones de la tecnología de diamantes.

Los fabricantes de diamantes han logrado desarrollar cortadores sintéticos de diversos componentes, resistencias, tamaños y formas para utilizarlos en un sin número de procesos y actividades industriales. Los principales cortadores sintéticos policristalinos disponibles para la industria petrolera se ilustran en la Figura 10.

NOMENCLATURA.

Se emplea un número selectivo de términos para identificar las barrenas PDC. Las iniciales PDC se refieren al cortador (Figura 5) que se monta en la barrena PDC y que se discute en este estudio. Los términos genéricos "barrenas de cizallamiento" y "diamante policristalino compacto", no están limitados a un diamante compacto

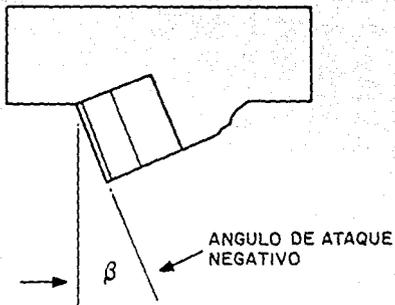


FIGURA 7

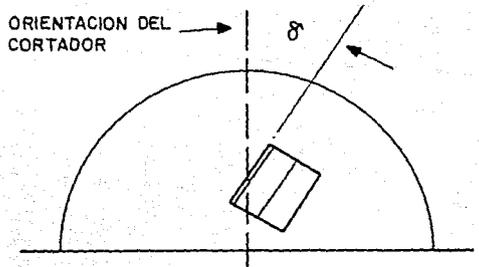


FIGURA 9

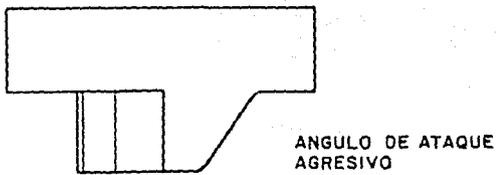


FIGURA 8

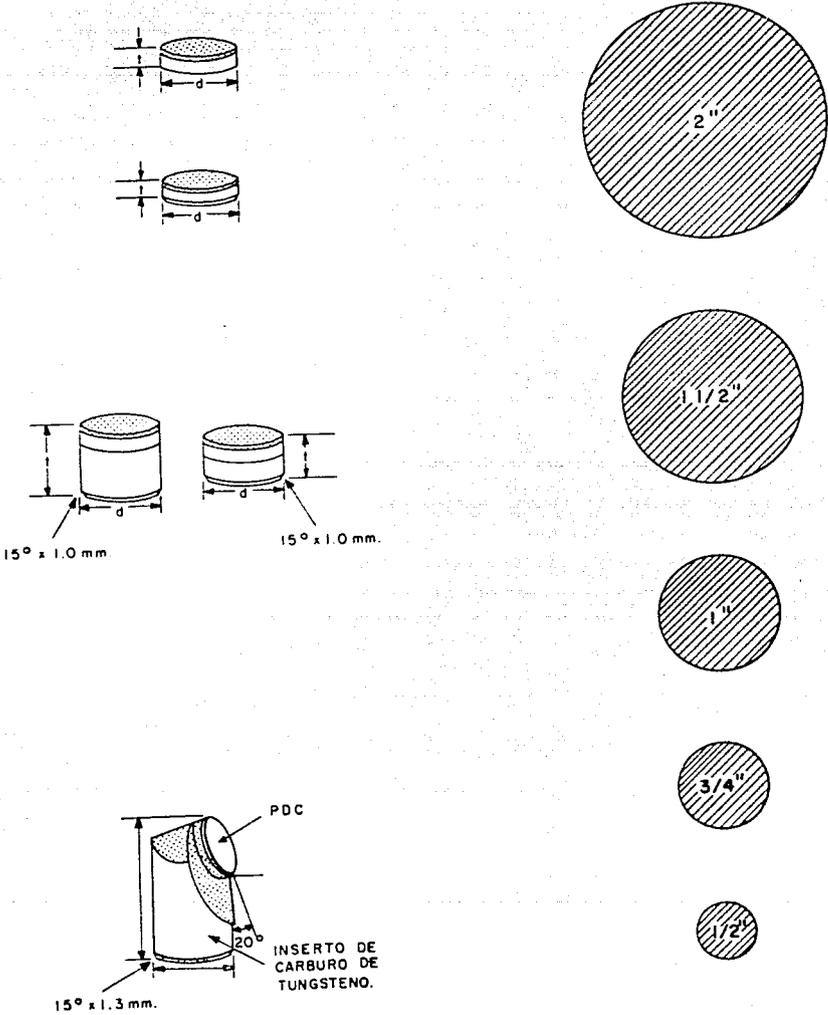


FIGURA 10

específico que vincule la matriz de carburo de tungsteno dado (Figura 6). El término "barrena Stratapax" se refiere al nombre comercial usado por el diseñador del diamante compacto.

Las barrenas PDC están constituidas por las partes que se ilustran esquemáticamente en la Figura 11.

Un nuevo producto llamado "diamante policristalino térmicamente estable" (TSP), es un diamante sintético que se fabrica del mismo material usado para barrenas PDC, excepto que en estos diamantes las fracciones de cobalto son eliminadas.

Un diamante TSP generalmente se usa para reemplazar cristales de diamante natural en barrenas de diamante.

CARACTERISTICAS.

Una característica del cortador PDC es la fina capa PDC (0.5 mm [0.02 pg.]), que se coloca en la parte superior de una base maciza (2.7 mm [0.11 pg.]) de carburo de tungsteno (Figura 5). Esta característica es de primordial importancia en las barrenas PDC; el cortador se autoafila, ya que el carburo de tungsteno se usa en menor orden de magnitud en relación al diamante, de aquí que el peso sobre barrena (PSB) esté limitado por las capas de diamante.

El cortador con ángulo de ataque negativo de 0.26 radianes [15 °] (Figura 7), inicialmente actúa como un cortador extremadamente afilado. El cortador se va desgastando con el tiempo, desarrollando en el diamante un ligero achatamiento, provocando que la carga sobre la barrena aumente gradualmente para mantener el ritmo de penetración.

Probablemente la mayor ventaja de los cortadores PDC es que es la

NOMENCLATURA DE LA BARRENA PDC

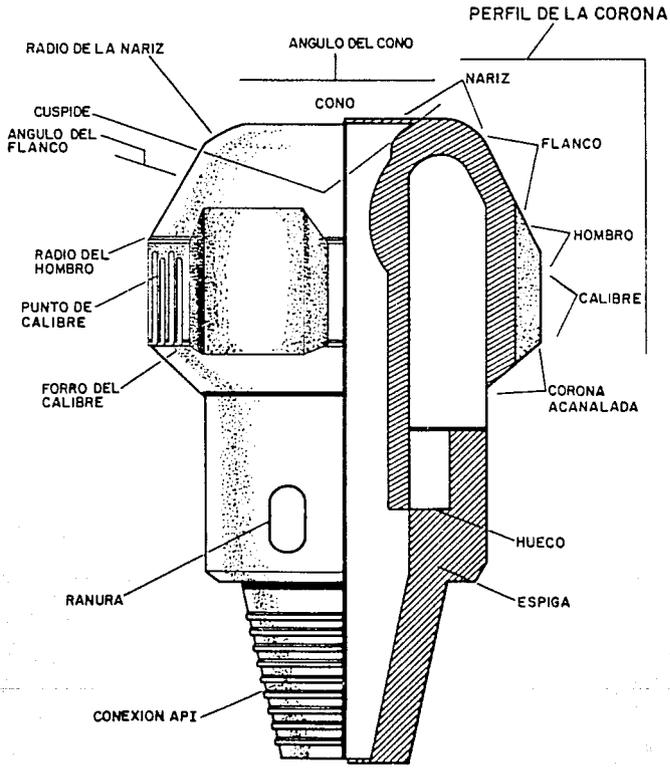


FIGURA II

primer barrena de fricción con autoafilamiento⁽⁴⁾. De tal manera que estas barrenas (PDC) sufren un menor despostillamiento que las barrenas de roles y mucho menor que las barrenas de diamantes. Esta es otra cualidad en sus características de rápida perforación en ausencia del fenómeno de embolamiento.

Los diamantes compactos son un ejemplo de ingeniería en cortadores de diamante, como una alternativa económica que no se puede obtener de diamantes naturales. Con respecto a su geometría, los cortadores están disponibles en forma cilíndrica en varios tamaños siendo los más grandes de 5 cm [2 pg.] de diámetro (Figura 10) o bien pueden ser cortados en diferentes formas por medio de un rayo laser . También es posible obtener otros cortadores con cara frontal plana.

El empleo de la estructura policristalina es debida a que la capa de diamante se gasta por microdespostillamientos, mientras que la base de carburo de tungsteno que soporta la delgada capa de diamante sufre el mayor desgaste. Se dispone también de otros cortadores que pueden unirse (con soldadura de bronce) a otros elementos tales como: botones de carburo de tungsteno (Figura 10), los cuales se insertan a presión dentro del cuerpo de la barrena (Figura 12) o a un cilindro de carburo de tungsteno (Figura 13), soldados o incrustados dentro de la matriz de la barrena.

ESTABILIDAD A LA TEMPERATURA.

Los cortadores PDC tienen una limitada temperatura de estabilidad de alrededor de 700 °C [1292 °F]⁴, en la que la capa de diamante se desintegra como una consecuencia de las impurezas (tales como el

cobalto). Esta fue una de las causas que más afectaron adversamente en la década de 1970 la utilización de las barrenas PDC en el campo, motivo por el cual, se desarrolló una técnica confiable para unir el cortador compacto a la barrena con un mínimo de daño en la capa de diamante. Hoy en día, este problema ya se ha resuelto, sin embargo, los diamantes compactos quedan sujetos a la temperatura crítica de los tres últimos ciclos de unión (soldadura de bronce).

A una temperatura mayor a los 700°C [1292 °F], el ritmo de desgaste se incrementa por efecto de la alta temperatura, como un resultado de la presencia de Cobalto en el espacio poroso entre los granos de diamante y las uniones. Dado que la expansión térmica del Cobalto es considerablemente mayor que la del diamante, causa un esfuerzo interno, el cual aumenta con la temperatura. Estos esfuerzos combinados con esfuerzos residuales y el esfuerzo inducido por la acción mecánica del cortador, raramente romperá las uniones. Las uniones se fatigan por la fluctuación de cargas sobre el cortador, el cual se debilita por la presencia del Cobalto, que promueve a su vez la grafitación del diamante a elevadas temperaturas, dando como resultado una reducción en la dureza del material. El resultado de todo lo anterior es el microdespostillamiento seguido de microfracturas, debidas al incremento de temperatura durante la perforación.

TEMPERATURA DEL DIAMANTE DURANTE LA PERFORACION.

Ortega y Glowka^{3,6}, desarrollaron un modelo para predecir la temperatura del cortador. Su modelo concidera un desgaste total plano, suponiendo que la capa de diamante y el carburo de tungsteno estan en con-

tacto con la roca a la misma presión, lo cual es falso. Los experimentos de Zijsling⁷, demostraron que el desgaste es mayor en el carburo de tungsteno durante la perforación. El encontró que la superficie de diamante transmite una fuerza mucho mayor al carburo. Es por esto, que el carburo de tungsteno se desgasta más rápidamente que el diamante en orden de magnitud. Un hecho que Glowca y Ortega⁽⁸⁾ han ignorado y que es uno de los aspectos más importantes, está relacionado con el autoafilamiento de las barrenas PDC.

Zijsling⁽⁷⁾, observó que la capa de diamante que más se desgasta es la frontal (donde las temperaturas son mayores), dando como resultado un mayor ángulo de ataque (-1.36 radianes [-78°]) bajo la capa de diamante. Él demostró que durante la perforación, este desgaste se va sustituyendo por la roca del fondo, funcionando como un aislador que reduce la temperatura del cortador. En síntesis, los cálculos demuestran que la temperatura en el cortador se incrementa con la velocidad del cortador y con el embolamiento del mismo.

RESISTENCIA AL IMPACTO.

Los diamantes PDC, son los mejores tipos de cortadores para perforar rocas suaves, firmes y sin abrasividad que no se resquebrajan como los cristales de diamante.

Sin embargo, la resistencia al impacto de los diamantes compactos no es ideal. Esto se explica como consecuencia del esfuerzo originado primordialmente por las diferentes expansiones térmicas del diamante, el carburo de tungsteno y el Cobalto, que están presentes cuando se fabrican los cortadores y durante la perforación. Debido a que los

esfuerzos e impactos se reciben directamente en la fina capa de diamante y dado que esta capa se encuentra unida a un sustrato de carburo de tungsteno con menor rigidez, los impactos mencionados pueden provocar la separación de la capa de diamante con el carburo e inclusive provocar un fuerte despostillamiento. Los daños por impacto pueden ocurrir tanto en su manejo como en su operación; de este modo, la barrena puede impactarse en su transportación al pozo, en su manejo en el piso de perforación, cuando se corre la barrena muy rápido impactandola contra las paredes del agujero o cuando se perforan formaciones con nódulos de calcita o piritita. La resistencia al impacto es un problema de área, en la cual el cortador recibe una marcada atención.

Un factor determinante en el futuro de las barrenas PDC se vincula con la investigación y desarrollo de nuevos cortadores, los cuales a su vez, están relacionados con la Química de los materiales. Algunos investigadores como Sneddon y Hall⁸, han dedicado su trabajo al desarrollo de diamantes de la misma calidad al mejor PDC natural. Resulta necesario entonces, desarrollar cortadores para rocas duras y abrasivas, lo cual se ha intentado con diamantes TSP, mismos que se tratarán brevemente en la sección III.6.

DESARROLLO DE LAS BARRENAS PDC.

El problema principal de las barrenas PDC, en la década de 1970, fue el desarrollo de una tecnología para mantener la integridad de la barrena. Hoy día ese problema se ha superado aumentando la utilización de estas barrenas notablemente. Uno de los mayores avances en el mejoramiento de las barrenas PDC, es la perforación de lutitas usando

lodo base aceite. El desarrollo de las barrenas PDC a seguido un comportamiento similar al que tuviera el lodo base aceite con relación al lodo base agua, mejorando sus resultados en la década de 1980.

TIPOS DE BARRENAS PDC.

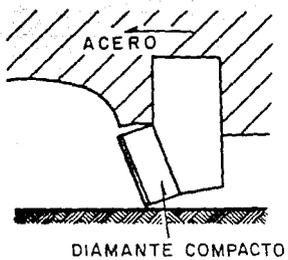
Se han establecido básicamente dos tipos de barrenas: una barrena con cuerpo de acero (Figura 12) y una barrena con cuerpo de matriz (Figura 15).

La barrena con cuerpo de acero fue la que se promovió inicialmente por la Compañía General Electric, quien creó los primeros cortadores PDC sin incluir la tecnología de la matriz. Se ha establecido que las barrenas con cuerpo de acero son más baratas que las barrenas con cuerpo de matriz. El cuerpo de acero es completamente maquinado, en tanto que los botones completos con sus cortadores de diamante soldados (con bronce), se insertan a presión dentro de los agujeros maquinados en la barrena (mediante un procedimiento similar al seguido en la instalación de botones de carburo).

Las barrenas con cuerpo de matriz se fabrican por el mismo procedimiento que las barrenas de diamante, ofreciendo una gran flexibilidad en cuanto a vías de agua, toberas intercambiables o tipo de escarpado.

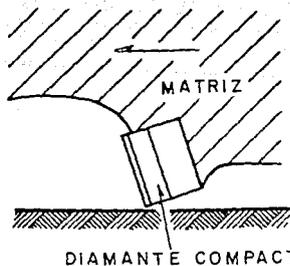
Los cortadores PDC montados en el substrato, usualmente se sueldan directamente a la matriz. Algunas ventajas de las barrenas con cuerpo de matriz son: su mayor resistencia a la erosión (en la construcción de la matriz), su mayor calibre de protección y mínimas posibilidades de fracturar los botones debido a su construcción.

El embolamiento de la barrena PDC puede deducirse por la caída de



BARRENA CON CUERPO DE ACERO

FIGURA No. 12



BARRENA CON CUERPO DE MATRIZ

FIGURA No. 13

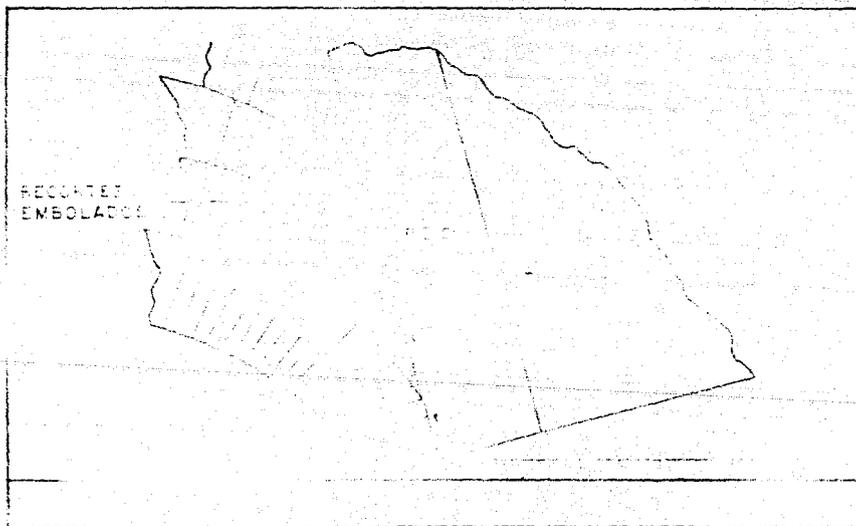


FIGURA 14

presión y la falla del torque al aplicar peso. Se tienen clasificados dos mecanismos de embolamiento:

A) Algunas lutitas que contienen montmorrillonita o illita, generalmente tienden a embolar las barrenas PDC cuando se utiliza lodo base agua. Las emulsiones inversas y los lodos base aceite inhiben la tendencia de embolamiento.

B) Otras lutitas duras también pueden embolar la barrena a través de un mecanismo diferente, aún teniendo lodo base aceite. El embolamiento de la barrena ocurre cuando la fuerza de fricción total actuando sobre los cortadores es mayor que el esfuerzo de compresión de la viruta, inmediatamente arriba de la zona de corte (Figura 14).— Una barrena PDC se ve gravemente afectada (más que otras) por el embolamiento, debido a que el mecanismo de corte, saca los recortes de la barrena más que de el fondo del pozo.

Se considera que los fluidos de emulsión inversa y base aceite, son los mejores para perforar con barrenas PDC.

III.2 CLASIFICACION IADC

En esta sección se presenta un sistema de clasificación para barrenas de perforación de cortadores fijos, que fue adoptado por la Asociación Internacional de Contratistas de Perforación (IADC) en 1987. El sistema que se presenta a logrado conjuntar en un sólo código mas de 200 tipos de barrenas desarrolladas por no menos de 10 fabricantes mayores y por muchos fabricantes pequeños. El código se aplica adecuadamente tanto para barrenas de perforación como para barrenas nucleadoras, con diamante natural, diamante policristalino (PDC), diamante térmicamente estable (TSP) o cualquier otro tipo de cortadores fijos.

La clasificación utiliza cuatro características en el orden que ilustra la Figura 15, para indicar siete aspectos de diseño, que son: a) tipo de cortador, b) material del cuerpo, c) perfil de la barrena, d) descarga del fluido, e) distribución de flujo, f) tamaño del cortador y g) densidad del cortador.

El código de las cuatro características es integrado en un formato de reporte de perforación diario IADC-API que se ilustra en la Figura 16. Para distinguir los códigos de las barrenas tricónicas de las de cortadores fijos, se utiliza un número y una letra respectivamente al inicio de cada código.

Las cuatro características en el código de clasificación IADC de cortadores fijos se describen a continuación²:

1. Tipo de Cortador y Material del Cuerpo. Observando la Figura 15 nos damos cuenta que el primer caracter puede definirse con cualquiera

CODIGO DE CLASIFICACION DE CUATRO CARACTERES

10.

TIPO DE CORTA-
DOR Y MATERIAL
DEL CUERPO

20.

PERFIL DE
LA
BARRENA

30.

DISEÑO
HIDRAULICO

40.

TAMAÑO Y
DENSIDAD
DEL
CORTADOR

- ↓
- D - DIAMANTE NATURAL (cuerpo de matriz)
 - M - PDC cuerpo de matriz
 - S - PDC cuerpo de acero
 - T - TSP cuerpo de matriz
 - O - Otras

FIGURA 15

RECORD DE LA BARRENA

BARRENA No	4	5	
TAMAÑO	17 1/2"	12 1/4"	
CODIGO IADC	515 C	M545	
MARCA	X	Y	
TIPO	modelo A	modelo B	
No. SERIE	FK 861	42301	
JETS / TFA (1/32" / pg ²)	3-15 1-18	0.665	
PROF. FINAL	3953 pies	6187 pies	
PROF. INICIAL	2367 pies	3963 pies	
INTERVALO CORTADO	1566 pies	2234 pies	
HORAS TOTALES	61.0	54.5	
DES G A S T E	ESTRUCTURA DE CORTE		
	I O D L	2 5 B T H	4 2 C T C
	B C O R	E 1/16" J D L O G	X I N D F M
	G P M / B O M B A	4 9 0 1 2 1 5 0	4 3 0 1 2 2 5 0

FIGURA 16

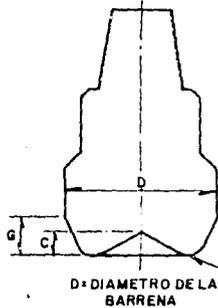
de las cinco letras presentadas, que son: D- diamante natural/cuerpo de matriz, M- PDC/cuerpo de matriz, S- PDC/cuerpo de acero, T- TSP/cuerpo de matriz, O- otras.

2. Perfil. El segundo caracter del código es un dígito entre 1 y 9, el cual se refiere al perfil de la sección transversal (Figura 17A y 17B). Se definen 9 tipos de perfiles básicos por arreglo de 2 parámetros (conicidad exterior y concavidad interior) en un arreglo de 3 x 3. A los renglones y columnas del arreglo se les asignan valores altos, medios y bajos para cada parámetro. El calibre alto sistemáticamente disminuye de arriba hacia abajo. El cono alto disminuye de izquierda a derecha; por lo tanto a cada perfil se le asigna un número. Se presentan dos versiones de perfiles; la versión de la Figura 17A generalmente la usan los fabricantes. La Figura 17B ilustra una versión que es más usada por el personal de campo. Las secciones achuradas representan el rango de variación de cada categoría. Cada una de las nueve categorías tiene asignado un nombre específico. El número 0 (cero) se emplea para perfiles de barrena poco usuales que no pueden ser descritos en un arreglo de 3 x 3.

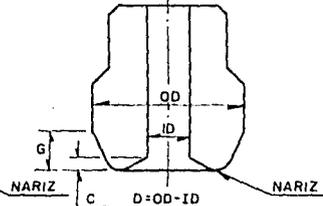
3. Diseño Hidráulico. El tercer caracter del código utiliza también dígitos del 1 al 9 para referirse al diseño hidráulico de la barrena (Figura 18), el cual se describe por dos componentes: el tipo de orificios de salida del fluido y la distribución de flujo. Se emplea un arreglo de 3 x 3 para conjuntar estos aspectos, variando los tipos de orificio de chorros (jets) intercambiables a fijos, aumentando la abertura de izquierda a derecha en el arreglo. La distribución de flujo varía de hojas a un abanico o cara abierta de arriba hacia abajo. El IADC no tiene explícitamente definida la diferencia entre las tres categorías de distribución de flujo. El

PERFILES DE BARRENAS

BARRENA DE PERFORACION



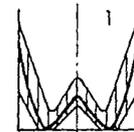
BARRENA NUCLEADORA



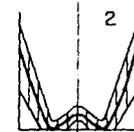
G - ALTURA DEL CALIBRE	C = ALTURA DEL CONO		
	ALTA $C > \frac{1}{4}D$	MEDIA $\frac{1}{8}D < C < \frac{1}{4}D$	BAJA $C < \frac{1}{8}D$
ALTO $G > \frac{3}{4}D$	1	2	3
MEDIO $\frac{1}{8}D < G < \frac{3}{4}D$	4	5	6
BAJO $G < \frac{1}{8}D$	7	8	9

FIGURA 17-A

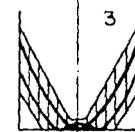
PERFILES DE BARRENAS



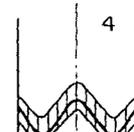
1
CONICIDAD LARGA
CONO PROFUNDO



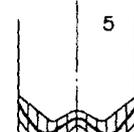
2
CONICIDAD LARGA
CONO MEDIO



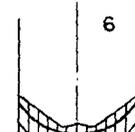
3
CONICIDAD LARGA
CONO SOMERO
(PARABOLICO)



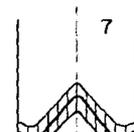
4
CONICIDAD MEDIA
CONO PROFUNDO



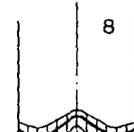
5
CONICIDAD MEDIA
CONO MEDIO



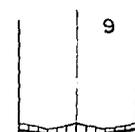
6
CONICIDAD MEDIA
CONO SOMERO
(REDONDEADO)



7
CONICIDAD CORTA
CONO PROFUNDO
(INVERTIDO)



8
CONICIDAD CORTA
CONO MEDIO



9
CONICIDAD CORTA
CONO SOMERO
(ACHATADO)

FIGURA 17-B

DISEÑO HIDRAULICO

	JETS INTERCAM- BIABLES	TOBERAS FIJAS	PASO ABIERTO
HOJAS	1	2	3
ABANICO	4	5	6
CARA ABIERTA	7	8	9

CODIGO ALTERNO

R — FLUJO RADIAL
 X — FLUJO CRUZADO
 O — OTROS

FIGURA 18

TAMAÑO Y DENSIDAD DEL CORTADOR

TAMAÑO	DENSIDAD		
	LIGERA	MEDIA	PESADA
LARGO	1	2	3
MEDIO	4	5	6
PEQUEÑO	7	8	9

O - IMPREGNADA

RANGO DE TAMAÑO DEL CORTADOR	DIAMANTE NATURAL piedras por kilate	DIAMANTES SINTETICOS altura del cortador
------------------------------------	---	--

LARGO	< 3	> 5/8"
MEDIO	3-7	3/8" - 5/8"
PEQUEÑO	> 7	< 3/8"

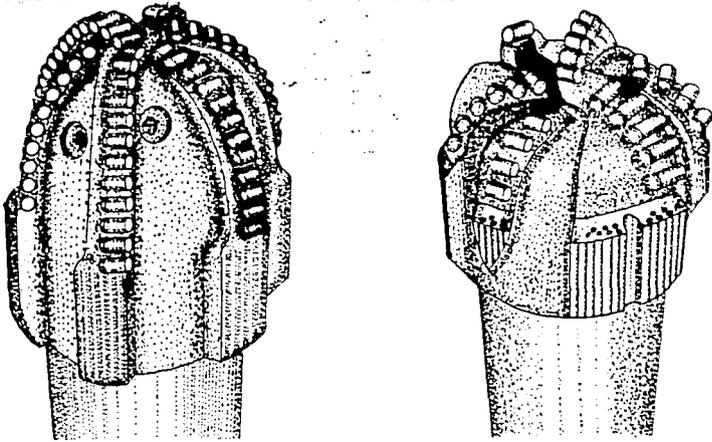
LA DENSIDAD DEL CORTADOR ESTA
DETERMINADA POR EL FABRICANTE.

FIGURA 19

término hojas, se refiere a restricciones de flujo continuo con una distancia del cuerpo de la barrena de más de 1 pg.. El término abanico se refiere a restricciones de flujo continuo con una distancia del cuerpo de la barrena de 1 pg. o menos. El término cara abierta se refiere a flujo sin restricciones. Las letras R (flujo radial), X (flujo cruzado) u O (otros) se usan en casos especiales.

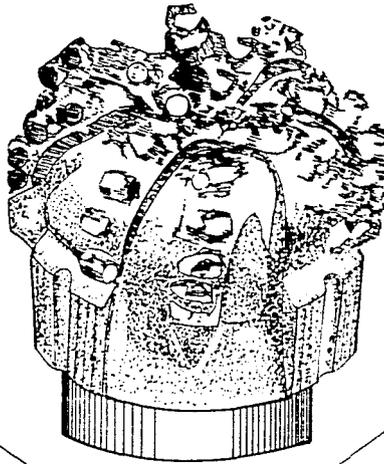
4. Tamaño y Densidad del Cortador. El cuarto caracter utiliza también dígitos del 1 al 9 y el dígito 0 se refiere al tamaño del cortador y la densidad del mismo. Al igual que la característica anterior, se utiliza un arreglo de 3 x 3 de tamaños y densidades de cortadores. La densidad varía de ligera, media y alta de izquierda a derecha en la matriz. El tamaño del cortador varía desde grande, medio y pequeño de arriba hacia abajo. La última combinación de cortadores pequeños con alta densidad se designan con el dígito cero. Figura 19

Ejemplos. La Figura 20 clasifica a una barrena PDC con cuerpo de matriz con un perfil parabólico de conicidad alargada, toberas intercambiables, con cortadores de tamaño estandar y de alta densidad, que de acuerdo al sistema de clasificación del IADC corresponde a M346. La Figura 21 ilustra una barrena PDC con cuerpo de acero, con un perfil ligeramente cóncavo sin conicidad y cortadores de tamaño estandar medio, en un diseño de cara abierta con toberas intercambiables, correspondiendo esta barrena a una clasificación M646.



M 346
 PDC CUERPO DE MATRIZ ← → PDC DE TAMAÑO MEDIO CON ALTA DENSIDAD DEL CORTADOR
 CONICIDAD ALARGADA PFRFIL. PARABOLICO → ABANICO CON TOBERAS REPLAZABLES

FIGURA 20



PDC CUERPO DE MATRIZ → TAMAYO Y DENSIDAD DE LOS CORTADORES MEDIO
 PERFIL CONCAVO ACHATADO → **M646** ← JETS INTERCAMBIABLES EN CARA ABIERTA

FIGURA-21

III.3 SELECCION DE BARRENAS

La adecuada selección de la barrena constituye el factor más importante para obtener el mejor desempeño de la misma, debido a que en la selección se toma en cuenta el medio al que estará expuesta la barrena.

Los factores determinantes en la buena selección de la barrena serán:

- a) La descripción geológica detallada de la formación a perforar
- b) El tipo de fluido de perforación usado
- c) La optimización de la hidráulica (número y tamaño de toberas apropiado).
- d) La factibilidad de optimizar las condiciones de operación, dependiendo de la verticalidad del agujero.
- e) La resistencia de la roca para seleccionar el tamaño, la densidad, el ángulo de ataque y la orientación de los cortadores así como la conicidad de la barrena (perfil).

Tomando en consideración los factores anteriores y la experiencia de los fabricantes de barrenas, se ha conjuntado una guía⁽⁹⁾ que puede servir de auxiliar en la selección de barrenas en el campo. La tabla de la Figura 22 ilustra la guía de selección de barrenas. Asimismo, la tabla de la Figura 23 ilustra la guía de selección de cortadores.

Existen otros criterios de selección de barrenas PDC, tal es el caso del método CEC, el cual se describe brevemente a continuación.

La capacidad de intercambio catiónico (CEC) de la lutita, proporciona una guía útil que interrelaciona a las barrenas PDC con la

GUIA DE SELECCION DE BARRENAS DE DIAMANTE

FORMACION	TIPO DE ROCA	BARRENAS PDC	BARRENAS D.N.	BARRENAS TSP
		CODIGO I. A. D. C.		
FORMACION SUAVE CON CAPAS PEGAJOSAS Y BAJA RESISTENCIA COMPRESIVA	LUTITA MARGA	M 314 M 611 M 612 M 672 M 342		
FORMACION SUAVE CON BAJA RESISTENCIA COMPRESIVA Y ALTA PERFORABILIDAD	MARGA SAL ANHIDRITA ARCILLA	M 312 M 645	D2R1 D1X2	
FORMACION SUAVE A MEDIA CON BAJA RESISTENCIA COMPRESIVA CON INTERCALACION DE CAPAS DURAS	ARENA ARCILLA YESO	M-646 M-346 M-256	D2R2 M263	T2R8 T646
FORMACION MEDIA A DURA DENSA CON ALTA A MUY ALTA RESISTENCIA COMPRESIVA PERO NO ABRASIVA O CON PEQUEÑAS CAPAS ABRASIVAS	ARCILLA MUDSTONE ARENISCA CALIZA DOLOMIA ANHIDRITA		D2X5 D4X6	T2X8 T2R8
FORMACION DURA Y DENSA CON MUY ALTA RESISTENCIA COMPRESIVA Y ALGUNAS CAPAS ABRASIVAS	SILTSTONE ARENISCA MUDSTONE.		D5X9 D4X9	D 560
FORMACION EXTREMADA - MENTE DURA Y ABRASIVA	CUARCITA VOLCANICA			D 560

FIGURA 22

ESFUERZOS RELATIVOS DE LA ROCA Y TIPOS DE CORTADOR RECOMENDADOS			
ESFUERZO DE LA ROCA (DUREZA)	ESFUERZO COMPRESIVO	TIPO DE ROCA	TIPO DE CORTADOR RECOMENDADO
MUY BAJA RESISTENCIA (MUY SUAVE)	< 4000 psi	ARCILLAS SUAVES Y ARENAS NO CONSOLIDADAS	CORTADORES YUMBO PDC
BAJA RESISTENCIA (SUAVE)	4000 - 8000 psi	YESO, LUTITA, ARENISCAS, ARCILLAS, EVAPORITAS	PDC MOSAICOS
MEDIANA RESISTENCIA (MEDIO DURA)	8000 - 20000 psi	CONGLOMERADO, ARENA, CALIZA, MARGA, ARENISCAS MEDIAS Y ARCILLAS DURAS	ALGUNOS PDC MOSAICOS TSP
ALTA RESISTENCIA (DURA)	16000 - 32000 psi	DOLOMITAS DURAS, CALIZAS CRISTALINAS, ARENISCAS DURAS, ARCILLAS FRAGILES	ALGUNOS TSP MOSAICOS DIAMANTE NATURAL
MUY ALTA RESISTENCIA (MUY DURA)	> 32000 psi	ARENISCAS DURAS, IGNEAS CUARCITAS, METAMORFICAS	PIEDRAS PEQUEÑAS DE DIAMANTE NATURAL

FIGURA 23

ESFUERZOS RELATIVOS DE LA ROCA Y TIPOS DE CORTADOR RECOMENDADOS			
ESFUERZO DE LA ROCA (DUREZA)	ESFUERZO COMPRESIVO	TIPO DE ROCA	TIPO DE CORTADOR RECOMENDADO
MUY BAJA RESISTENCIA (MUY SUAVE)	< 4000 psi	ARCILLAS SUAVES Y ARENAS NO CONSOLIDADAS	CORTADORES YUMBO PDC
BAJA RESISTENCIA (SUAVE).	4000 -8000 psi	YESO, LUTITA , ARENISCA, ARCILLAS, EVAPORITAS	PDC MOSAICOS
MEDIANA RESISTENCIA (MEDIO DURA)	8000 -20000 psi	CONGLOMERADO, ARENA, CALIZA, MARGA, ARENISCAS MEDIAS Y ARCILLAS DURAS	ALGUNOS PDC MOSAICOS TSP
ALTA RESISTENCIA (DURA)	16000-32000 psi	DOLOMITAS DURAS, CALIZAS CRISTALINAS, ARENISCAS DURAS, ARCILLAS FRAGILES	ALGUNOS TSP MOSAICOS DIAMANTE NATURAL
MUY ALTA RESISTENCIA (MUY DURA)	> 32000 psi	ARENISCAS DURAS, IGNEAS CUARCITAS, METAMORFICAS	PIEDRAS PEQUEÑAS DE DIAMANTE NATURAL

FIGURA 23

formación.

Los valores de CEC miden la afinidad de la lutita al agua, de este modo es posible indicar su plasticidad. Los valores se obtienen típicamente mediante la prueba reactiva de azul de metileno, para determinar en el mismo equipo (pozo) el contenido de arcilla de la formación.

En general, los valores de CEC disminuyen con la profundidad y la temperatura. Esto es, las arcillas duras corresponden a bajos valores de CEC y son las que menos reaccionan con el agua.

Observando la gráfica de la Figura 24 encontramos que las arcillas con valores de CEC entre 12 y 15 (arcillas relativamente firmes), pueden perforarse eficientemente con barrenas PDC convencionales. Sin embargo, las arcillas con valores entre 30 y 15 pueden perforarse con mayor facilidad con barrenas PDC de cortadores yumbo. Finalmente las arcillas con valores altos de CEC es recomendable utilizar barrenas PDC de aletas de pescado.

GUIA DE SELECCION DE BARRENAS PDC

CEC DE LA ARCILLA

6 9 12 15 18 21 24 27 30 33 36

BARRENAS PDC
CONVENCIONALES

BARRENAS PDC
CON CORTADORES JUMBO

BARRENAS PDC DE
ALETAS DE PESCAO

CORRELACION DEL GOLFO DE MEXICO
(APROXIMACION)

FIGURA 24

III.4 OPERACION Y EVALUACION

CONSIDERACIONES HIDRAULICAS.

La hidráulica de la barrena es vital para cualquier operación de perforación y es aún más importante cuando se utilizan barrenas PDC; debido a que su acción de cepillado y larga profundidad de corte, generan un alto volumen de recortes que deben ser removidos eficientemente del fondo del agujero.

Como ya se ha mencionado en capítulos anteriores los cortadores PDC tienen dos limitantes básicas, que son: a) límite de resistencia al impacto y b) el límite térmico. La resistencia al impacto está determinada por la orientación del cortador, el ángulo de ataque y el cuerpo de la barrena. La resistencia a la temperatura está determinada por una combinación de las propiedades de los materiales constituyentes del diamante y las cualidades hidráulicas de la barrena.

Dos importantes parámetros en la aplicación de barrenas PDC son el ritmo de flujo (gasto) y caballaje hidráulico aplicado. El gasto y el caballaje hidráulico se pueden ajustar variando el área de flujo total de la barrena (TFA). EL TFA es igual al área de las toberas abiertas en las barrenas PDC y está basada en el área de flujo efectiva en barrenas de diamante natural o barrenas TSP.

La energía hidráulica se calcula como el caballaje hidráulico por pulgada cuadrada (HSI) de área frontal de barrena, usando la siguiente fórmula.

$$\text{HSI} = \frac{Q \Delta P}{1714 (\text{Diámetro Bna.})^2 (\pi/4)}$$

donde: Q, Gasto (GPM)

ΔP , Caída de presión (lb/pg²)

El HSI se incrementa al reducir el TFA o incrementando el ritmo de flujo (gasto). Cambios pequeños en el diámetro de las toberas tienen mayor influencia en el HSI que en el gasto.

LIMPIEZA DE LA BARRENA.

Cuando hablamos de hidráulica en la barrena nos referimos a los caballos de poder por pulgada cuadrada de área de agujero (HSI) sin tener muy en cuenta los chorros (jets). El aumento de HSI no elimina automáticamente el embolamiento de la barrena y obviamente no es la mejor solución para eliminarlo. El problema de embolamiento se puede reducir a un mínimo, mediante el direccionamiento de los recortes hacia afuera, tan rápidamente como se vayan produciendo. Las barrenas que se fabrican actualmente ya cuentan con esta modificación. Otra ayuda para evitar el embolamiento es triturar los recortes tan pronto como se vayan formando mediante un cortador ligeramente convexo. Todos estos aspectos conciernen en forma directa a los fabricantes de barrenas y cortadores, ya que existe la necesidad de desarrollar cortadores de autolimpieza, orientando la cara del cortador hacia el chorro de fluido de perforación tanto como sea posible, para mejorar su enfriamiento y de este modo incrementar la vida de la barrena. De lo anterior se puede decir, que la limpieza de la barrena estará determinada por el arreglo y tamaño de los cortadores y los chorros

(jets) diseñados para su limpieza¹⁰.

ESTABILIDAD DE LA BARRENA

Un diseño de barrena balanceada es aquel en que todas las fuerzas de corte actúan en los cortadores resolviéndose en la fuerza axial (peso sobre barrena), momento a través de la línea central de la barrena (torque) y fuerza central cercana a cero¹⁴. La fuerza radial es llamada también fuerza de imbalance. Debido a que la magnitud de la fuerza de imbalance es casi directamente proporcional al peso sobre barrena, la fuerza de imbalance es relacionada como un porcentaje del peso sobre barrena. Las herramientas analíticas para medir el imbalance de barrenas PDC, indican que éstas poseen aproximadamente un 10 % de imbalance.

Otros aspectos importantes para mantener la barrena balanceada son las condiciones de operación, la sarta empleada y las condiciones mecánicas del agujero. De este modo la estabilidad mecánica arriba de la barrena (en la herramienta), debe diseñarse para prevenir el giro.

Brett¹⁵, señala que las altas velocidades de rotación incrementan la tendencia de la barrena a girar; en muchos casos esta tendencia de giro es mayor cuando se emplean motores de fondo que cuando se usa mesa rotatoria.

Otros aspectos importantes son: la geometría de afilado del cortador, el perfil de la barrena, la profundidad del cono, el ángulo de ataque, etc. La explicación de los aspectos anteriores se puede resumir destacando que los ángulos agudos de los cortadores afilados crean una mayor agresividad en la superficie de corte, por ende aumenta la tendencia de la barrena a agarrarse a la formación y empezar a girar. También, los centros de rotación con conicidad son más sencibles a

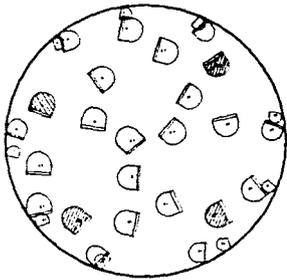
desplazarse lateralmente con relación a las barrenas de perfil más plano. Además, algunas pruebas con barrenas de cono profundo disponibles comercialmente muestran una tendencia a girar mayor que muchas otras barrenas de conicidad somera. Conjuntamente con lo anterior, se han hecho pruebas que demuestran que las barrenas con cortadores con ángulos de ataque positivos ($+ 15^\circ$), mejoran la estabilidad de la barrena a bajas velocidades de rotación pero no logran eliminar la tendencia a caminar (girar) a velocidades altas. Un modo posible de mejorar la estabilidad de la barrena, es incorporando un anillo estabilizador de cortadores en la cara de la barrena (los cortadores del anillo deben tener un ángulo de ataque positivo). Una barrena comercial que demostró baja tendencia al giro a bajas velocidades de rotación se ilustra en la Figura 25.

Actualmente se ha desarrollado una técnica que proporciona mucho mayor estabilidad que cualquier otro método descrito anteriormente; el procedimiento utiliza un sector frontal de la barrena sin cortadores para balancear las fuerzas creadas por los mismos. La Figura 26 ilustra un esquema del concepto. La suma vectorial de las fuerzas de corte está dirigida a un sector que tiene mucho menor contacto friccional con la pared del agujero que los cortadores.

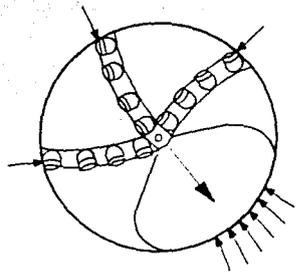
Después de lo dicho en estos párrafos, se establece que el giro de la barrena al perforar, es un factor muy significativo que contribuye a reducir el buen desempeño y promueve la falla prematura de las barrenas PDC.

EVALUACION DE LAS BARRENAS PDC.

El sistema usado para determinar el grado de desgaste de las



CAMA DE CORTADORES DE BARRENA
CON ANILLO ESTABILIZADOR
FIG. 25



ESQUEMA DE BARRENA
CON BAJO CALIBRE DE FRICCIÓN
FIG. 26

barrenas de cortadores fijos es el adoptado por el Subcomité de Barrenas de Perforación de la IADC⁴⁴. El objeto del sistema es crear una imagen mental de la condición física de la barrena y al mismo tiempo lograr la compatibilidad con el sistema de barrenas de roles.

El sistema es flexible para trabajar adecuadamente en records de fabricantes de barrenas, en reportes de operación y en bases de datos.

El formato del sistema de grado de desgaste se muestra en la Figura 27, el cual consta de ocho factores que describen el desgaste de la barrena. Los primeros cuatro espacios se usan para describir la estructura de corte. En los primeros dos espacios la cantidad de estructura desgastada se establece usando una escala lineal de 0-8, la cual es consistente con el grado de desgaste del diente en barrenas de roles. La cantidad de cortador desgastado representado por 0 hasta 7 se ilustra esquemáticamente en la Figura 28. Un 8 significa un desgaste total del cortador. Esta misma escala debe usarse para barrenas TSP y diamante natural; un cero significa que no hay desgaste y un 4 significa que se tiene un 50 % de desgaste.

Los primeros dos espacios del formato se usan para los 2/3 del radio interior de la barrena y 1/3 del radio exterior de la misma, como lo ilustra la Figura 28. Por ejemplo observamos en la Figura 28 que los cinco cortadores en el área interior serán graduados (calificados) con un 2. Esto se calcula promediando los grados de desgaste de los cortadores individuales en el área interior, así: $(4+3+2+1+0)/5 = 2$. De manera similar el grado de desgaste del área exterior será 6. Note que para una barrena nucleadora la línea central en la Figura 28 será el diámetro interior de la barrena.

El tercer espacio se usa para describir las características de desgaste primario de la barrena. Las características de desgaste que

C - CONO
 N - NARIZ
 T - CONICIDAD
 S - HOMBRO
 G - CALIBRE
 A - TODAS LAS AREAS
 M - MEDIA HILERA
 H - CENTRO DE HILERA

I - EN CALIBRE
 1/16" - 1/16" DESCALIBRADO
 2/16" - 1/8" DESCALIBRADO

ESTRUCTURA DE CORTE				B	G	MARCAS		
HILERAS INTERIORES	HILERAS EXTERIORES	CARACTERÍSTICA DE DESGASTE	LOCALIZACIÓN	AGUANTE/SELLOS	CALIBRE 1/16"	OTRAS CARACTERÍSTICAS	RAZON DE SACAR	
•	•	•	•	•	•	•	•	

O - SIN DESGASTE
 8 - ESTRUCTURA DE CORTE DESTRUIDA

RESISTENCIA SIN SELLOS
 O - VIDA SIN USO
 8 - VIDA USADA TOTALMENTE
 RESISTENCIA DE SELLOS
 E - SELLOS EFECTIVO
 F - FALLA DE SELLOS
 X - BARRENAS DE CORTADORES FIJOS

*BC - CONO ROTO
 BT - DIENTES/CORTADORES ROTOS
 BU - EMBOLADA
 *CC - CONO RAJADO
 *CD - CONO DAÑADO
 CI - INTERFERENCIA DE CONO
 CR - NUCLEADO
 CT - DIENTES/CORTADORES DESPOSTILLADOS
 ER - EROSION
 FC - ACHATAMIENTO DE LA CRESTA
 HC - VERIFICACION DE CALOR
 JD - DAÑO POR CHATAPRA
 *LC - PERDIDA DEL CONO
 LN - PERDIDA DE TOBERA
 LT - PERDIDA DE DIENTES/CORTADORES
 OC - DESGASTE FUERA DE CENTRO
 PB - PRESION DE LA BARRENA
 PN - TOBERA TAPADA / PASO DE FLUJO
 RG - CALIBRE ALREDEDOR
 RO - ANILLO EXTERIOR
 SD - DAÑO DEL RECUBRIMIENTO
 SS - DESGASTE DEL FILO
 TR - HUELLA
 WO - LAVADO EXTERNO DE LA BARRENA
 WT - DESGASTE DE DIENTES, CORTADORES
 NO - NO MAYOR/OTRAS CARACTERÍSTICAS DE DESGASTE
 *MUESTRA EL NUMERO DE CONO (S) LOCALIZACION

BHA - CAMBIO DE APAREJO DE FONDO
 DMF - FALLA DEL MOTOR DE FONDO
 DSF - FALLA DE LA SARTA DE PERFORACION
 DST - PRUEBA DE PERFORABILIDAD
 DTF - FALLA DE LA HERRAMIENTA DE FONDO
 LOG - CORRIDA DE REGISTROS
 RIG - REPARACION DEL EQUIPO
 CM - CONDUCCION DEL LODO
 CP - NUCLEO
 DP - TAPON PERFORADO
 FM - CAMBIO DE FORMACION
 HP - PROBLEMAS DE AGUJERO
 HR - HORAS
 PP - PRESION DE BOMBEO
 PR - RITMO DE PENETRACION
 TD - PROF. TOTAL / PROF. DESARROLLADA
 TQ - TORQUE
 TW - ENROSQUE
 WC - CONDICIONES CLIMATOLOGICAS
 WO - LAVADO EXTERIOR DE LA SARTA

FORMATO Y CODIGOS DEL SISTEMA DE GRADO DE DESGASTE
 FIGURA 27

se aplican a barrenas con cortadores fijos se enlistan en la Figura 27.

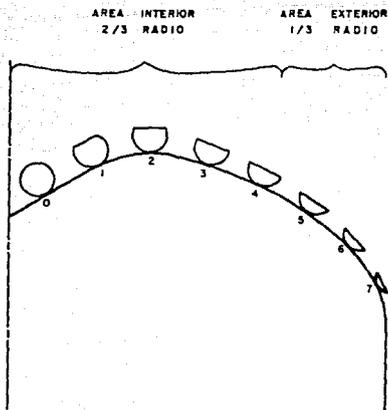
La localización del desgaste primario característico se describe en el cuarto espacio. Se cuenta con seis opciones: cono, nariz, conicidad, hombro, calibre y todas las áreas. La Figura 29 ilustra cuatro posibles perfiles de barrenas de cortadores fijos con las diferentes áreas marcadas; usando esta Figura como guía, será posible definir claramente las diferentes áreas de muchos perfiles.

El cuarto espacio siempre será una x para barrenas de cortadores fijos ya que no poseen asientos. Este espacio se puede usar para hacer la distinción de los grados de dureza para barrenas de cortadores fijos de los grados de dureza de las barrenas de roles.

El calibre de la barrena se registra en el sexto espacio. si se mide con calibrador de acero, se usa una I. De este modo la cantidad de calibre perdido se anotará en 1/16 avos de pulgada.

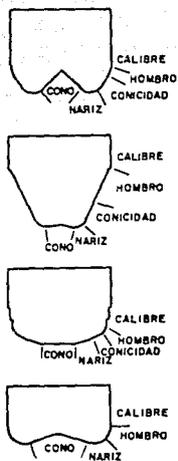
El séptimo espacio es para el desgaste secundario característico de la barrena, para el cual se emplea el mismo listado que fue usado en el desgaste primario. La razón por la cual la barrena se saca de operación se ilustra en el octavo espacio, para lo cual se utiliza el código listado que muestra la Figura 27.

En una corrida de barrena es deseable siempre tener un desgaste uniforme sin embargo, los cortadores se pueden desgastar (WT) de varias maneras que se ilustran esquemáticamente en la Figura 30, en donde se observan cortadores rotos (BT) y cortadores perdidos (LT) tanto para botones como para cilindros PDC. Note en la Figura 30 que la pérdida (LT) incluye tanto la pérdida del botón o cilindro entero como la pérdida del compacto únicamente. También se puede erosionar la cara de la barrena durante el trabajo, lo cual se muestra también



ESQUEMA DEL DESGASTE DEL CORTADOR

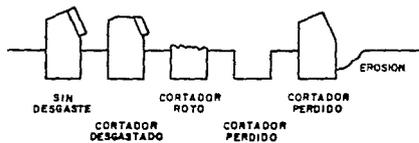
FIGURA 28



PERFILES DE BARRENAS CON CORTADORES FIJOS

FIGURA 29

CORTADORES DE POSTE O BOTON



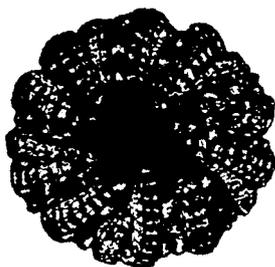
ESQUEMA DE LAS CARACTERISTICAS DE DESGASTE COMUN

FIGURA 30

esquemáticamente en la Figura 30.

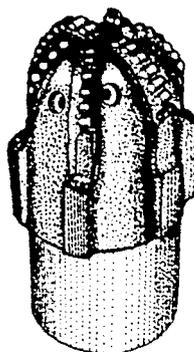
Las Figuras 31 y 32 ilustran dos ejemplos de desgaste de las barrenas de cortadores fijos en las cuales se ha utilizado el nuevo sistema de evaluación de desgaste. La Figura 31 muestra una barrena PDC embolada (BU), la estructura de corte se desgastó y el calibre se alteró. La barrena se sacó del pozo porque dejó de perforar (PR).

La Figura 32 ilustra una barrena PDC con un anillo exterior en la zona del hombro. El área externa se calificó con 8 mientras que el área interna con un 1, la barrena permaneció en calibre y se observa la pérdida de cortadores. Finalmente la barrena se sacó por exceso de torque (TQ).



ESTRUCTURA DE CORTE				B	C	MARCAS	
NILE RAS INTE RIORES	NILE RAS EXTE RIORES	CARACTE RISTICAS DE DES GASTE	LOCA LIZA CION	RESIS TENCIA SELLOS	CALI BRE 1/16"	OTRAS CARAC TERIS TICAS	RAZON DE SACAR
O	O	BU	A	X	I	NO	PR

Fig. 6 Ejemplo de barreno PDC embolada



ESTRUCTURA DE CORTE				B	C	MARCAS	
NILE RAS INTE RIORES	NILE RAS EXTE RIORES	CARACTE RISTICAS DE DES GASTE	LOCA LIZA CION	RESIS TENCIA SELLOS	CALI BRE 1/16"	OTRAS CARAC TERIS TICAS	RAZON DE SACAR
1	8	RO	S	X	I	LT	TQ

Fig. 7 Ejemplo de barreno PDC con anillo ext.

FIGURA 31

FIGURA 32

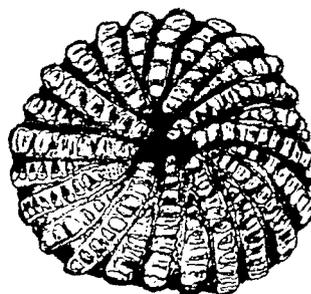
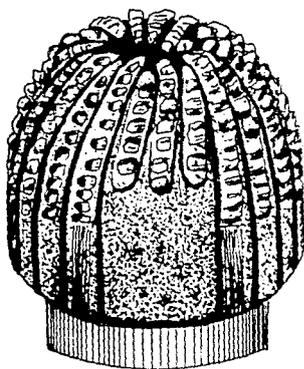


FIGURA 33

III.5 APLICACIONES

Las barrenas con cortadores PDC en la actualidad tienen un gran número de aplicaciones relacionadas con la perforación de pozos. las más importantes se tratan a continuación:

A) Cuando se tienen yacimientos depresionados, usualmente no se pueden perforar con un sobrebalance razonable de presión, resultando la perforación lenta y costosa. En caso de usar barrenas tricónicas, el sobrebalance que es comúnmente excesivo, causa la compresión de la roca y dificulta la acción de remoción. Las barrenas de diamante pueden mejorar a las tricónicas por su acción de cizallamiento. En tanto que las barrenas PDC, cepillan la roca exponiendo su permeabilidad a la filtración del lodo, lo cual puede ser promovido por una hidráulica más baja que el sobrebalance efectivo. Koskie y Appen¹⁶ reportan los buenos resultados obtenidos al perforar arenas depresionadas con barrenas PDC tipo aleta en Colombia; estas barrenas perforaron rápidamente soportando un sobrebalance de 10 lb-m/gal [1198 kg/m³]. Del mismo modo, otros autores¹⁷ reportan buenos resultados al emplear barrenas TSP en el sur de Louisiana.

B) Las barrenas PDC requieren poco peso (PSB) para perforar rápidamente. De aquí que estas barrenas sean populares donde es necesario el control de la desviación, particularmente en agujeros desviados. Es indispensable verificar si la formación es susceptible a perforarse con PDC, en caso contrario, la barrena sufrirá un rápido desgaste, como ya se había mencionado antes. En formaciones poco propicias para la PDC, el desgaste de la barrena se puede tolerar

dependiendo del beneficio obtenido en el control de la desviación.

C) Las características direccionales de las barrenas PDC difieren de las barrenas tricónicas. Las PDC, particularmente las de cuerpo de matriz, se usan para prevenir la tendencia a girar hacia la derecha de las barrenas tricónicas. Por ejemplo: Perry¹⁸ encontró que el ritmo de giro de varias barrenas en el Golfo de Tailandia es generalmente a la izquierda, aunque la tendencia a girar hacia la derecha depende más del peso sobre barrena aplicado (PSB), el ritmo de rotación (RPM), del perfil de la barrena y de la estabilización de la sarta.

D) Actualmente se dispone de sistemas de conducción con motores de fondo o turbinas de conducción con medición mientras se perfora (MWD), que proporcionan a la perforación una máxima velocidad de penetración mediante una buena selección del peso sobre la barrena (PSB). Con estos implementos, el concepto de perforación direccional tradicional cambia, obteniendo agujeros lisamente curvados sin patas de perro. Cuando las formaciones permiten la utilización de las barrenas PDC, ésta se constituye en un excelente candidato para ejecutar la desviación, ya que es de una sola pieza, tiene larga vida, perfora rápidamente, requiere poco peso (pocos lastrarbarrenas), permitiendo en algunos casos perforar desde la zapata de la T.R. hasta la profundidad total de la etapa en una sola corrida.

E) La perforación con turbina o con motor de desplazamiento positivo, requiere de la utilización de barrenas de alta velocidad de rotación y las barrenas PDC pueden desempeñar bien esta tarea. Sin embargo, como ya se había señalado con anterioridad, una alta velocidad de rotación tiene como consecuencia mayor fricción, aumento de temperatura y rápido desgaste. Por otro lado, la perforación con turbina empleando barrenas PDC, estará limitada por la

temperatura de estabilización de la misma. Algunos investigadores sostienen que a pesar de algunas desventajas de las barrenas PDC, éstas se pueden emplear en la turboperforación en forma económica particularmente en operaciones costosas, en el control direccional y en algunas otras operaciones propias de la ingeniería. Por otro lado, la perforación con motores de desplazamiento positivo es menos complicada que la turboperforación, usualmente más eficiente y cubre mayor rango de velocidades controladas, sin embargo, esta variación en las velocidades provoca un mayor deterioro en los motores de desplazamiento positivo (MDP). Se ha determinado que el empleo de las barrenas PDC con MDP llega a ser económico cuando la perforación es más rápida que el costo de la renta de los equipos, esto es, en operaciones de bajo costo.

F) Las barrenas PDC tienen un monopolio de aplicación en la perforación de agujeros con diámetro pequeño para el rango de formaciones adecuadas, debido a que cubre las condiciones ideales para agujeros reducidos, tales como: estar fabricadas de una sola pieza, tener larga vida, requerir bajos pesos sobre barrena y proporcionar altos ritmos de penetración. Podría decirse que las barrenas PDC son razonablemente las más adecuadas para agujeros pequeños.

G) La perforación de agujeros de diámetro mayor o igual a $17 \frac{1}{2}$ in [44.5 cm], utilizando barrenas PDC tiene más limitantes que en diámetros pequeños, debido al alto costo de la barrena y al alto riesgo de falla. Así mismo, en las barrenas grandes se hace necesaria una mayor limpieza de la barrena y cortadores (para evitar el embolamiento y el sobrecalentamiento), buena estabilización, suficientes cortadores en la barrena y altos gastos para poder desalojar la cantidad de recortes producidos.

En la actualidad se estudian muchas otras aplicaciones de las barrenas PDC, entre las que destacan: la ampliación de agujeros, la perforación horizontal, el corte de núcleos, la molienda de acero, etc., etc.

La utilización de estas barrenas en el campo ha dejado experiencias que son importantes de destacar, entre otras se tienen las siguientes:

1. Las barrenas PDC perforan muy rápido y no permiten observar los quiebres en la velocidad de penetración como ocurre normalmente con otro tipo de barrenas en zonas de presión anormalmente altas. En consecuencia, los operadores requieren de un buen sistema de alarma para la detección de reventones.

2. Los recortes producidos por las barrenas PDC, son generalmente finos en relación al tamaño del grano. Muchas formaciones cambian a un estado plástico durante el corte y algunas otras rocas se convierten en metamórficas debido al elevado calor generado por la fricción.

III.6 BARRENAS TSP Y BARRENAS HIBRIDAS

DIAMANTES TSP.

Los diamantes TSP son del mismo material que se emplea en los cortadores de barrenas PDC, excepto que la fracción de Cobalto es eliminada. Además los diamantes TSP no se unen a una base o sustrato (como los cortadores PDC). Consecuentemente, los diamantes TSP no están limitados por la resistencia al impacto y la estabilidad a la temperatura, como ocurre en los cortadores PDC y que es resultado de la presencia de otros materiales. Puede decirse que los diamantes TSP, son el primer intento en la búsqueda de materiales capaces de perforar rocas duras y abrasivas.

Se han formulado otros tipos de diamantes TSP, por ejemplo: los que emplean Silicio en lugar de Cobalto ya que es un material que no reduce la estabilidad térmica del diamante durante su fabricación y por lo tanto no requiere ser eliminado. Este tipo de diamantes no presentan porosidad y requieren altos pesos sobre barrena. Es obvio que se requiere conocer el tipo de diamante TSP montado en la barrena para obtener un mayor rendimiento del mismo.

CARACTERISTICAS DEL DIAMANTE TSP.

Los diamantes sintéticos TSP substituyen generalmente a los diamantes naturales.

Desafortunadamente y debido a la reducción en el contenido de Cobalto, los diamantes TSP tienen una resistencia del 20 al 50 % menor que los cortadores PDC⁴. Los diamantes TSP se desgastan gradualmente desarrollando un frente plano, siempre y cuando no se fracturen como resultado de una sobrecarga. Esto último tendrá dos consecuencias: 1) La limitada superficie expuesta del TSP, hace que la barrena sea menos recomendable en relación a una PDC en formaciones que tienen tendencia a embolarse y por lo tanto, limita el empleo de los TSP. 2) El desgaste plano que desarrollan los diamantes con el uso, irá regularmente acompañado de altos pesos sobre barrena para mantener el ritmo de penetración con bajo ritmo de rotación (RPM), provocando frecuentemente rompimiento de los diamantes y dejando a la barrena con una menor superficie de ataque. Los diamantes TSP no se autoafilan y por consiguiente los cortadores se achatan al recibir el peso aplicado sobre la barrena. Su comportamiento es completamente diferente al de los cortadores PDC o a las barrenas de diamante, en las cuales el desgaste del sustrato o matriz es mucho más rápido que el diamante.

La distinción más importante entre los diamantes naturales y los diamantes TSP, es que los últimos tienen muchos ángulos afilados que pueden mantenerse durante la vida de la barrena. Esta razón explica porque las barrenas con diamantes TSP requieren menor peso sobre barrena que las barrenas de diamante (pero más que las barrenas PDC). El montaje es muy importante, ya que se deben evitar ángulos de acúñamiento ortogonales a los filos que provocarían el embolamiento de la barrena.

Los diamantes TSP son térmicamente estables a 1200 °C [2192 °F] y a 875 °C [1607 °F] en presencia de oxígeno y agua⁴. Por su mayor resistencia al impacto y calor, trabajan mejor que las barrenas PDC en

rocas duras y abrasivas.

Las barrenas TSP se ilustran en la Figura 33. Su versatilidad es limitada cuando se presentan tanto rocas duras como suaves, por lo que los pequeños cortadores triangulares han trabajado mejor en rocas con cierta dureza y abrasividad, como por ejemplo: carbonatos, anhidrita, arenas medio abrasivas, intercalaciones de arena dura y algunas arcillas. El empleo de barrenas de diamante TSP, de acuerdo a los resultados reportados en la literatura se encuentra en su fase inicial.

Las barrenas de diamante TSP van reemplazando paulatina y gradualmente a los diamantes naturales en su calidad, forma y precio, por lo que el propósito de los diamantes TSP es mejorar en su etapa intermedia y final sus cualidades, para reemplazar en forma definitiva a los diamantes naturales, aunque estos últimos son usados muy raramente en perforación.

Los diamantes TSP son más comparables a los diamantes carbonatados que a diamantes naturales, pero existe un fuerte potencial para el mejoramiento en las propiedades de los diamantes TSP. Otra opción de los diamantes TSP es la posibilidad de usarse en nuevos cortadores PDC y actualmente se realizan experimentos encaminados a usar un mosaico cortador de diamante TSP, en el que los diamantes son mantenidos en su lugar por una matriz circundante que puede asemejarse a la de carburo de tungsteno. Figura 34.

BARRENAS HIBRIDAS

Las barrenas híbridas constituyen un intento por mejorar el desempeño de las barrenas PDC en formaciones duras y abrasivas o

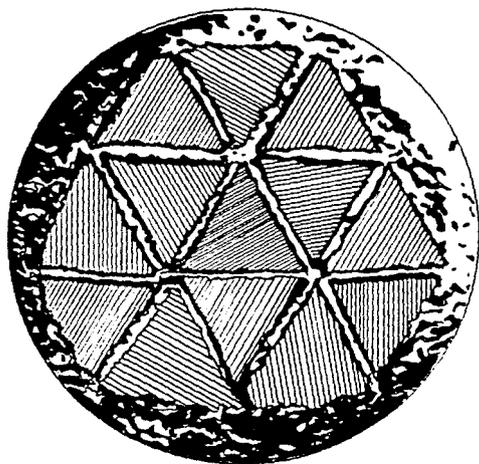


FIGURA 34

cuando se presentan intercalaciones de las mismas. En estos casos la capacidad de perforabilidad en las PDC se reduce, provocando el desgaste prematuro de los cortadores.

Los cortadores para rocas duras y abrasivas de las barrenas híbridas se componen de pequeños diamantes incrustados en la matriz, la cual posee una composición tal que se desgasta gradualmente cuando se pone en contacto con rocas abrasivas; mediante este mecanismo, los diamantes gastados se van remplazando por nuevos (como resultado del rompimiento de los anteriores). El número y disposición de los diamantes incrustados en la matriz, depende de la formación a perforar, por ejemplo: una formación abrasiva requiere una matriz más resistente al desgaste que una formación dura menos abrasiva (como la dolomia o la caliza); de otra manera el cortador para caliza dura se desgastaría extremadamente rápido. De forma opuesta, el cortador diseñado para rocas abrasivas no tendría un rendimiento eficiente, haciendo una perforación muy lenta con posibilidad de quemar el diamante.

Glowka y Maurer^{12,13}, han trabajado experimentalmente en barrenas híbridas y han encontrado en sus pruebas de laboratorio que el rendimiento de estas barrenas es mayor que las PDC en formaciones duras. Sin embargo, esto no se ha demostrado plenamente en el campo, pues sus pruebas son realizadas a la presión atmosférica y a la temperatura ambiente.

Las barrenas PDC como ya se ha dicho antes, trabajan mejor en formaciones suaves, suaves a medio duras y medio duras, no abrasivas. No obstante, su buen desempeño depende de la interacción entre la barrena, la formación a perforar, la sarta y las condiciones de operación. La experiencia en el uso de estas barrenas, demuestra que

el tipo de lodo, la hidráulica y el diseño de la barrena, afectan mucho más su desempeño que las variaciones en las propiedades del lodo. Las formaciones duras y/o abrasivas constituyen un tabú para las barrenas PDC, ya que causan un excesivo desgaste sobre estas últimas. Consecuentemente, es imperativo consultar los registros geofísicos, reportes del lodo y records de las barrenas de los pozos vecinos para planear la utilización de una barrena PDC. Las formaciones de areniscas y particularmente las que contienen granos de cuarzo, son virtualmente imposibles de perforar económicamente, pues son altamente destructibles para la barrena, no menos dañinas resultan las calizas duras y dolomias duras que son igualmente difíciles de perforar.

Como se ha mencionado en párrafos anteriores, los cortadores PDC se desgastan por efectos térmicos. Sin embargo, AMOCO a realizado pruebas que confirman que el desgaste inicial de los cortadores PDC es causado por daño de impacto.

Brett¹⁵, afirma que el fenómeno de giro de la barrena es la causa predominante del daño de impacto. El giro se define como una condición donde el centro instantáneo de rotación se mueve a través de la barrena cuando esta rota.

IV. DESARROLLO DE UN MODELO PARA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO DE BARRENAS PDC

IV.1 CRITERIO DE FALLA DE ROCAS Y MECANISMO DE CORTE DE CORTADORES PDC

Se presenta en esta sección el desarrollo de un modelo para predecir el comportamiento de barrenas de diamante policristalino compacto, que sustenta sus bases en mecanismos de falla de rocas y en el análisis de esfuerzos bajo las que están sujetas las mismas. Además se toma en cuenta en el análisis, la fricción ejercida entre la roca y el cortador que la penetra. Por su parte la roca se considera que obedece al criterio cedente de Coulomb-Mohr y el cortador se representa por un rectángulo bidimensional.

En la interfase roca-cortador, los esfuerzos no satisfacen únicamente la condición cedente, sino también son tales, que la relación del esfuerzo cortante con el esfuerzo normal es igual al coeficiente de fricción .

Se hace también una presentación resumida en los Apéndice B, C y D, de otros modelos publicados en la Literatura, que predicen el comportamiento de barrenas PDC y que han tenido buenos resultados al usarse en el campo.

Las barrenas de fricción dentro de las que se agrupan las barrenas PDC, han sido diseñadas para perforar fundamentalmente por un mecanismo de acuñamiento. Un enroscamiento del recorte en forma de viruta, contribuye a desalojar los fragmentos de roca de la parte central del agujero. La acción de acuñamiento de un elemento cortador en las barrenas de fricción justo antes de ejercer el corte se ilustra esquemáticamente en la Figura 35. El dibujo ilustra una fuerza vertical que se aplica sobre el elemento cortador como un resultado del peso aplicado de los lastrabarrenas sobre la barrena y una fuerza horizontal que se aplica sobre el elemento de corte, como un resultado de la aplicación del torque necesario para rotar la barrena. El resultado de estas dos fuerzas define el plano de ataque (introducción) o acuñamiento del elemento cortador. Los recortes son desalojados en un plano de corte que tiene un ángulo inicial correspondiente al plano de introducción, el cual es dependiente de las propiedades de la roca. La profundidad del corte está controlada por el plano de inclinación, el cual está basado en el esfuerzo de la roca y el radio del cortador. La profundidad del cortador puede expresarse en función del ángulo α que es función de la penetración deseada del cortador por cada revolución L_p y el radio r del centro del pozo. Esta relación puede definirse como:

$$\tan \alpha = L_p / 2 \pi r \quad (IV.1.1)$$

El ángulo formado entre el elemento y el fondo previene el acúñamiento cuando se ejerce la fricción contra el fondo del pozo obteniendo la viruta, causando que la barrena salte y vibre provocando el fenómeno de resonancia en la sarta. La relación peso-torque es muy importante para evitar que el cavado sea muy profundo existiendo la posibilidad de que la barrena se atasque. Un ligero ángulo de ataque puede ayudar a tener un mecanismo de acúñamiento eficiente y un ángulo de ataque positivo puede resultar innecesario, ya que la inclinación de la pendiente en el fondo del agujero se obtiene al operar la barrena adecuadamente. Los elementos de corte disminuyen su fuerza cuando el ángulo de ataque se incrementa.

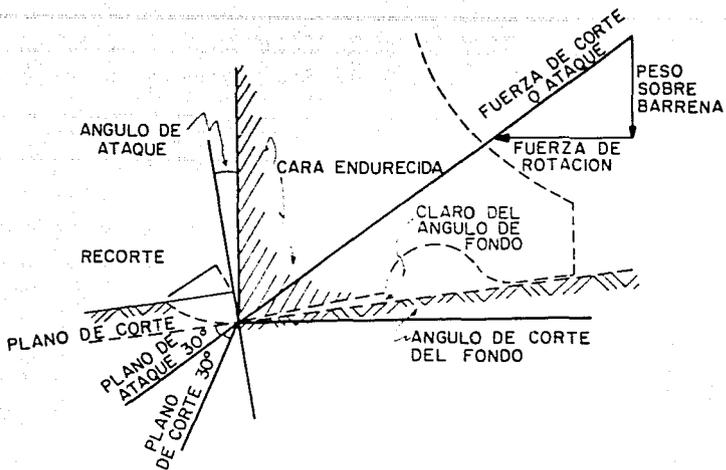
Las barrenas PDC y las barrenas de diamante, están diseñadas para perforar con muy poca penetración dentro de la formación. El mecanismo de perforación de estas barrenas se ejerce por la molienda de los granos retenidos por el cementante de la roca, hasta que los diamantes logran romperlos.

En un intento por medir los esfuerzos a que están sujetas las rocas en los procesos de perforación rotatoria, se desarrollaron varias teorías, dentro de las que destaca la de Mohr. El desarrolló una teoría de falla, en la cual el criterio de fracturamiento o cedencia ocurre cuando el esfuerzo de cizallamiento es mayor que la suma de la resistencia cohesiva del material " c " y la resistencia friccional de los planos de falla o de fractura. El criterio de Mohr se establece matemáticamente con la siguiente relación:

$$\tau = \pm (c + \sigma_n \tan \theta) \quad (IV.1.2)$$

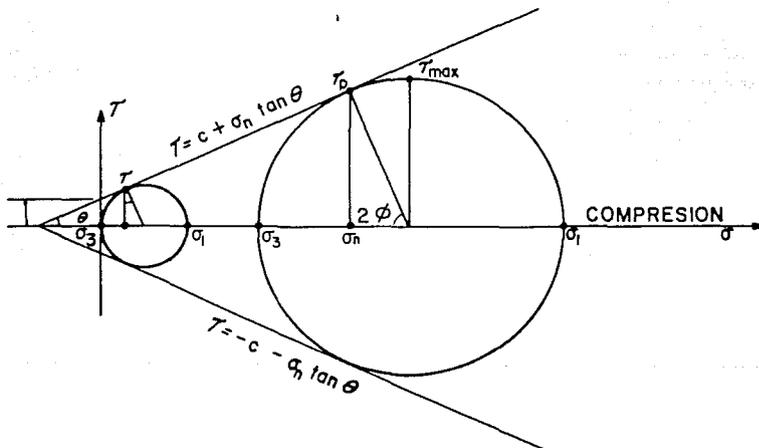
donde:

τ , esfuerzo cortante o de cizallamiento



ACCION DE ACUÑAMIENTO DE LAS BARRENAS PDC

FIGURA 35



CIRCULOS DE MOHR DEL CRITERIO DE FALLA DE COULOMB-MOHR

FIGURA 36

C , resistencia cohesiva de la roca
 σ_n , esfuerzo normal al plano de falla
 θ , ángulo de fricción interna

La Figura 36, ilustra que la ecuación de la línea es tangente a los círculos de Mohr para las pruebas más bajas en compresión hechas a diferentes niveles de presión de confinamiento.

El criterio de Mohr considera una muestra de roca que falla a lo largo de un plano (Figura 37), cuando se carga con una carga compresiva "F" y una presión de confinamiento "p". El esfuerzo σ_1 está dado por la siguiente expresión:

$$\sigma_1 = F / \pi r^2 \quad (\text{IV.1.3})$$

El esfuerzo de confinamiento está dado por:

$$\sigma_3 = p \quad (\text{IV.1.4})$$

Si examinamos un pequeño elemento en cualquier plano vertical seccionando la muestra, el elemento quedará en estado de esfuerzos como el mostrado en la Figura 38. También se pueden examinar las fuerzas presentes a lo largo del plano de falla usando los elementos seccionados en la Figura 39. La orientación del plano de falla se define por el ángulo ϕ entre el plano horizontal y el plano normal a la falla; éste también es igual al ángulo formado entre el plano de falla y la dirección del esfuerzo principal σ_1 . Tanto el esfuerzo de cizallamiento τ como el esfuerzo normal σ_n deben estar presentes para mantener el balance entre σ_1 y σ_3 .

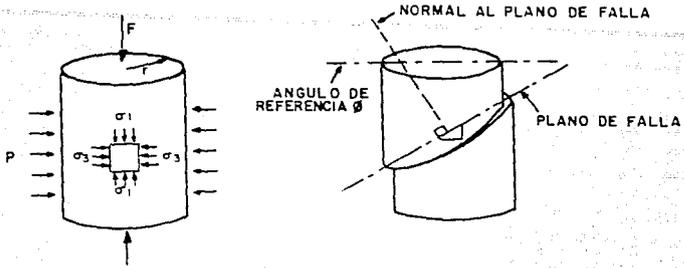


FIGURA 37

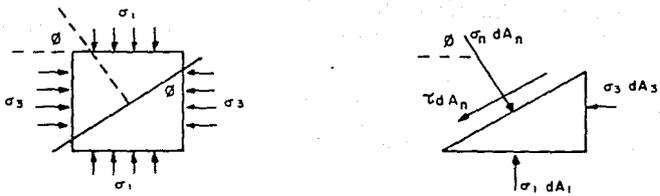


FIGURA 38

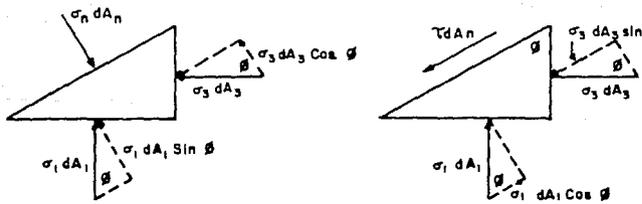


FIGURA 39

Sumando las fuerzas normales al plano de fractura, se tiene (Figura 39):

$$\sigma_n dA_n = \sigma_3 dA_3 \cos \phi + \sigma_1 dA_1 \sin \phi \quad (\text{IV.1.5})$$

El área unitaria a lo largo del plano de fractura dA_n , está relacionada con las áreas unitarias dA_1 y dA_2 por la siguiente expresión:

$$dA_3 = dA_n \cos \phi \quad (\text{IV.1.6})$$

y

$$dA_1 = dA_n \sin \phi \quad (\text{IV.1.7})$$

Substituyendo estas relaciones en la ecuación de balance de fuerzas se tiene:

$$\sigma_n = \sigma_1 \sin^2 \phi + \sigma_3 \cos^2 \phi$$

$$\sigma_n = \frac{1}{2} (\sigma_3 + \sigma_1) - \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\phi \quad (\text{IV.1.8})$$

Sumando las fuerzas paralelas al plano de fractura se tiene:

$$\tau dA_n = \sigma_1 dA_1 \cos \phi - \sigma_3 dA_3 \sin \phi \quad (\text{IV.1.9})$$

Expresando todas las áreas unitarias en términos de dA_n y simplificando se tiene:

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \phi \cos \phi$$

$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\phi \quad (\text{IV.1.10})$$

Observe que las ecuaciones (IV.1.8 y IV.1.10) están representadas gráficamente por el círculo de Mohr ilustrado en la Figura 40. Note además, que el ángulo de fricción interna θ y 2ϕ deben sumar 90° . El ángulo de fricción interna de varias rocas es de alrededor de 30° a 40° .

El criterio de falla de Mohr, puede usarse para predecir el ángulo característico entre el plano de cizallamiento y el plano de ataque. Suponiendo un ángulo de fricción interna de aproximadamente 30° , se tiene:

$$2\phi = 90^\circ - 30^\circ \quad \text{ó} \quad \phi = 30^\circ$$

Este valor de ϕ lo verificó Gray en pruebas experimentales efectuadas a presión atmosférica.

EJEMPLO. Se tiene una muestra de roca bajo una presión de confinamiento de 140 kg/cm^2 , la cual falla cuando se sujeta a una carga compresiva de 700 kg/cm^2 a lo largo del plano que forma un ángulo de 27° con la dirección de la carga compresiva. Usando el criterio de falla de Mohr, determine el ángulo de fricción interna, el esfuerzo de cizallamiento y la resistencia cohesiva del material.

SOLUCION. El ángulo θ y 2ϕ deben sumar 90° . Así, el ángulo de fricción interna estará dado por:

$$\theta = 90 - 2(27) = 36^\circ$$

El esfuerzo de cizallamiento se calcula usando la ecuación (IV.1.10) como se ilustra a continuación:

$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \text{ sen } (2\phi)$$

$$\tau = \frac{1}{2} (704 - 141) \text{ sen } (54^\circ) = 228 \text{ kg/cm}^2$$

El esfuerzo normal al plano de fractura se calcula usando la ecuación (IV.1.8), así:

$$\sigma_n = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \text{ cos } (2\phi)$$

$$\sigma_n = \frac{1}{2} (704 + 141) - \frac{1}{2} (704 - 141) \text{ cos } (54^\circ) = 257 \text{ kg/cm}^2$$

La resistencia cohesiva se puede calcular despejando c de la ecuación (IV.1.2), como sigue:

$$c = \tau - \sigma_n \tan \theta$$

$$c = 228 - 257 \tan (36^\circ) = 41 \text{ kg/cm}^2$$

IV.2 FUERZAS DE INTERACCION ROCA CORTADOR (CORTADORES NUEVOS)

El modelo modificado de la roca bajo la acción de un cortador PDC se ha desarrollado bajo las siguientes suposiciones:

Cortador PDC:

1. Rectángulo bidimensional
2. Cortador rígido (deformación elástica del PDC despreciable)
3. Desplazamiento perpendicular del PDC con respecto a la superficie de la roca
4. Existe fricción entre la roca y el PDC

Roca:

1. Semi-infinita, isotrópica y homogénea
2. Rígida-plástica (deformación elástica de la roca despreciable)
3. El criterio de falla obedece la condición de Coulomb (envolvente lineal de Mohr)
4. Superficie desgastada lisa.

De acuerdo con la teoría de falla de Mohr, se supone que la falla ocurre cuando el estado de esfuerzos es tal, que el círculo de esfuerzos de Mohr es tangente a una envolvente determinada experimentalmente. La curva de falla de Mohr frecuentemente se aproxima con una línea recta que comúnmente se conoce como criterio de falla de Coulomb-Mohr. Si la roca está bajo suficiente presión y exhibe ductilidad, se puede usar la envolvente lineal como condición cedente. El criterio cedente de Coulomb-Mohr se ilustra en la Figura 41 y se expresa con la ecuación (IV.2.1)

Algunas observaciones experimentales han demostrado que esta ecuación describe el comportamiento de muchas rocas, considerandola una primera aproximación. Es posible usar una condición cedente más exacta; sin embargo se incrementa la complejidad matemática del problema.

Hill¹⁹ consideró el caso general de tensión plana de un material plástico y propuso que cuando un círculo de esfuerzos es tangente a la envolvente, las ecuaciones que gobiernan los esfuerzos son hiperbólicas. Hill y Prandtl¹⁹, propusieron dos arreglos geométricos para dientes triangulares que han penetrado la roca, los cuales fueron tomados como base para el cortador PDC.

Un arreglo geométrico que satisface las condiciones de frontera para un cortador que ha penetrado un material obedeciendo el criterio cedente de Coulomb se ilustra en la Figura 42.

El ángulo ψ depende del coeficiente de fricción en la interfase roca cortador. Si $\psi/2 = \pi/4 - \theta/2$ la solución corresponde a un cortador PDC perfectamente lubricado sin fricción; y si $\psi = 0$, la solución corresponde a un cortador PDC perfectamente rugoso (Figura 41). Las dos familias de líneas de deslizamiento intersectan a los ángulos de $\pi/2 + \theta$ y cada familia de líneas intersecta la dirección del máximo esfuerzo compresivo (σ_1) con ángulos de $\pm(\pi/4 + \theta/2)$.

En la región triangular adyacente a la superficie libre, ambas familias de líneas de deslizamiento son rectas que indican un estado constante en que el esfuerzo principal no varía. El cambio de esfuerzos a lo largo de las líneas de deslizamiento en las curvas de abanico son constantes a lo largo de las líneas radiales. Así, los esfuerzos en la región de estado constante adyacente al rectángulo, dependen del ángulo de abanico.

El coeficiente de fricción ' μ ' entre la roca y el PDC se

relaciona con el esfuerzo cortante τ y con el esfuerzo normal reducido σ'_n en la interfase roca-cortador, mediante la siguiente expresión:

$$\tau = \mu \sigma'_n \quad (\text{IV.2.1})$$

Esta relación se representa por una línea que pasa por el punto c en el diagrama de Mohr (Figura 41). Como los círculos en el diagrama de Mohr que son tangentes a la envolvente cedente, representan las condiciones necesarias para que la roca ceda, el estado de esfuerzos adyacente al rectángulo esta dado por la intersección de la curva de fricción con uno de estos círculos (punto c de la Figura 41). El círculo particular se determina por el ángulo de abanico (β' en la Figura 42).

Se supone que la presión de confinamiento actúa en la interfase roca-cortador. Si la presión de confinamiento se excluye de la interfase, la línea de fricción inicia en el origen más que en el punto p en la Figura 41 y la ecuación (IV.2.1) se transforma en:

$$\tau = \mu(\sigma'_n + p) \quad (\text{VI.2.2})$$

De la Figura 42 se observa que el ángulo de abanico β' es:

$$\beta' = \beta + \frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2} - \frac{\psi}{2} \quad (\text{IV.2.3})$$

de la Figura 41 se tiene que:

$$\psi = \pi/2 + \theta - \alpha \quad (\text{IV.2.4})$$

substituyendo (IV.2.4) en (IV.2.3) tenemos:

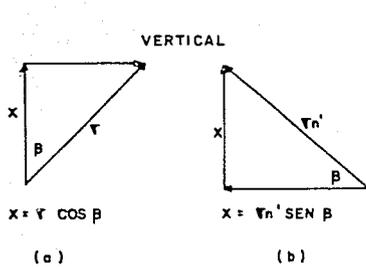


FIGURA 43

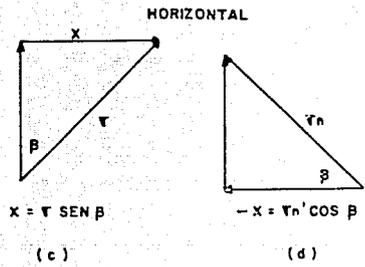


FIGURA 44

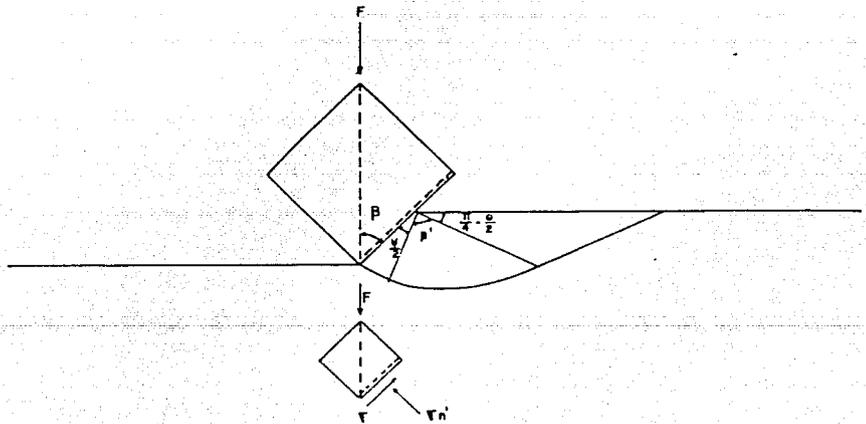


FIGURA 42

$$\beta' = \beta + \alpha/2 \quad (\text{IV.2.5})$$

del triángulo ABC en la Figura 41 se puede observar que:

$$\tan \alpha = \frac{\tau}{\frac{\sigma_1' + \sigma_2'}{2} - \sigma_n'}$$

rearrreglando la expresión anterior y usando la ecuación (IV.2.1) se tiene:

$$\tan \alpha = \frac{\mu}{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_1'}{\sigma_n'} + \frac{\sigma_2'}{\sigma_n'} \right)} \quad (\text{IV.2.6})$$

Las siguientes ecuaciones desarrolladas por Cheatham proporcionan la relación del esfuerzo compresivo de la roca.

$$\frac{\sigma_1'}{\sigma_p'} = \frac{1}{2 \sin \theta} \left[(1 + \sin \theta) e^{2\beta' \tan \theta} - (1 - \sin \theta) \right] \quad (\text{IV.2.7})$$

$$\frac{\sigma_2'}{\sigma_p'} = \frac{1 - \sin \theta}{2 \sin \theta} \left[e^{2\beta' \tan \theta} - 1 \right] \quad (\text{IV.2.8})$$

De la Figura 41 y por el teorema de Pitagoras se tiene:

$$AB^2 + BC^2 = AC^2$$

substituyendo las relaciones correspondientes obtenemos:

$$\left[\sigma_n' - \left(\frac{\sigma_1' + \sigma_2'}{2} \right) \right]^2 + (\mu \sigma_n')^2 = \left(\frac{\sigma_1' - \sigma_2'}{2} \right)^2 \quad \text{ó}$$

$$(1 - \mu^2) \sigma_n'^2 - (\sigma_1' - \sigma_2') \sigma_n' + \sigma_1' \sigma_2' = 0$$

resolviendo la ecuación anterior para σ_n' y dividiendo por σ_p' resulta:

$$\frac{\sigma_n'}{\sigma_p'} = \frac{\left(\frac{\sigma_1'}{\sigma_p'} + \frac{\sigma_2'}{\sigma_p'} \right) + \left[\left(\frac{\sigma_1'}{\sigma_p'} + \frac{\sigma_2'}{\sigma_p'} \right)^2 - 4(1 + \mu^2) \frac{\sigma_1' \sigma_2'}{\sigma_p'^2} \right]^{1/2}}{2(1 + \mu^2)} \quad \text{(IV.2.9)}$$

El esfuerzo compresivo de la roca a la presión de confinamiento se determina con la siguiente ecuación:

$$\sigma_p' = 2(c + p \tan \theta) \frac{\cos \theta}{1 - \sin \theta} \quad \text{(IV.2.10)}$$

Sin embargo como la presión de confinamiento (resultado de la presión diferencial entre la presión hidrostática y la presión de poro) es muy pequeña, se puede aproximar a cero; de esta manera la ecuación (IV.2.10) se transforma en:

$$\sigma_p' = 2c \frac{\cos \theta}{1 - \sin \theta} \quad \text{(IV.2.11)}$$

La fuerza generada por la carga para un PDC afilado (nuevo) (Figura 45), se obtiene de la definición de esfuerzo mediante la siguiente

relación:

$$F_{NC} = \sigma_n \cdot A_c \quad (\text{IV.2.12})$$

Asimismo usando la Ley de fricción de Amont, se tiene:

$$F_{sc} = F_{NC} \mu \quad (\text{IV.2.13})$$

Como las fuerzas actuando en un cortador nuevo se ejercen únicamente en la cara de ataque del cortador (Figura 45), se proyectan las fuerzas normal y de corte a los ejes principales, obteniendo las siguientes relaciones (Figuras 43 y 44):

$$F_v = F_{sc} \cos \beta + F_{NC} \sin \beta \quad (\text{IV.2.14})$$

$$F_H = -F_{sc} \sin \beta + F_{NC} \cos \beta \quad (\text{IV.2.15})$$

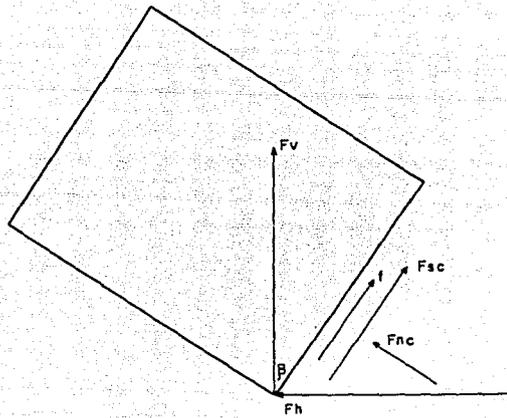


FIGURA - 45

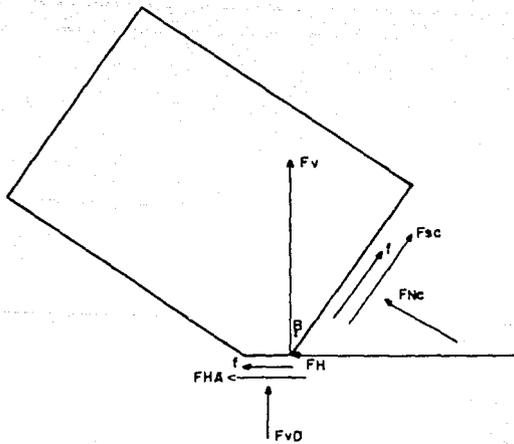


FIGURA - 46

IV.3 FUERZAS DE INTERACCION ROCA-CORTADOR (CORTADORES DESGASTADOS)

Cuando los cortadores se desgastan por efecto de la abrasión como resultado del uso, las fuerzas ejercidas sobre los cortadores cambian, ya que para mantener un ritmo de penetración dado, será necesario aumentar el peso sobre la barrena y el torque debido al achatamiento de los cortadores. La forma en que las fuerzas actúan sobre un cortador PDC desgastado se ilustra en forma esquemática en la Figura 46.

De la Figura 46 nos damos cuenta que en la región achatada debida al desgaste, se ejercen fuerzas adicionales para ejecutar la acción de corte, que no se tienen presentes en cortadores afilados. Empleando esta misma Figura, determinamos que:

$$F_{nc} = \sigma_n' A_c \quad (IV.3.1)$$

$$F_{sc} = F_{nc} \mu \quad (IV.3.2)$$

De la proyección de estas fuerzas a los ejes principales resultan las siguientes relaciones:

$$F_{vc} = F_{sc} \cos \beta + F_{nc} \sin \beta \quad (IV.3.3)$$

$$F_{hc} = -F_{sc} \sin \beta + F_{nc} \cos \beta \quad (IV.3.4)$$

Debido a que la acción de corte del PDC es por fricción (cepillado), se considera que el esfuerzo normal ejercido sobre el cortador es el mismo en cualquier punto de contacto con la roca. Por lo que:

$$F_{VD} = \sigma_n' A_v \quad (IV.3.5)$$

La determinación del área desgastada del cortador se presenta en forma detallada en la sección 3 del Apéndice A.

La fuerza horizontal en la región desgastada se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_{HD} = F_{VD} \mu \quad (IV.3.6)$$

Sumando las fuerzas parciales ejercidas en un cortador con desgaste, obtenemos las fuerzas totales, así:

$$F_v = F_{vc} + F_{vd} \quad (IV.3.7)$$

$$F_H = F_{Hc} + F_{HD} \quad (IV.3.8)$$

IV.4 INTEGRACION DE FUERZAS Y EVALUACION DEL DESGASTE DE LOS CORTADORES

La estimación de las fuerzas ejercidas sobre el cortador, es la primera fase en el desarrollo del modelo, ya que siendo el PDC el elemento de la barrena, es necesario llevar a cabo la integración de las fuerzas para estimar el peso sobre barrena, el torque y el desgaste de la misma.

De acuerdo con el IADC, los perfiles de barrenas PDC se pueden agrupar en nueve categorías que fueron descritas con detalle en el Capítulo III. Sin embargo, para el desarrollo de este análisis, se tomaron sólo los perfiles de la diagonal principal del arreglo matricial, mismos que fueron usados para calcular el número de cortadores apropiado, empleando para ésta estimación un diámetro de cortador de 1.32 cm, el cual es considerado en la literatura como un tamaño medio. Los perfiles de las barrenas, así como la estimación del número de cortadores con sus posiciones angulares a lo largo de cada perfil, se presentan en la Sección 2 del Apéndice A.

Se considera en el análisis que el área de corte del primer cortador (contando del centro hacia la periferia de la barrena) es total, mientras que los cortadores subsecuentes solo cortan parcialmente, como resultado de la acción de corte del anterior. La Sección 1 del Apéndice A, presenta el cálculo de las áreas de corte, que son utilizadas en la estimación de las fuerzas.

Una vez obtenidas las fuerzas que actúan en cada cortador, se integran éstas proyectándolas a los ejes principales y sumándolas para

obtener la fuerza vertical y la fuerza horizontal actuando en la barrena. Este cálculo es prolongado, por lo que, el autor se auxilió en este proceso de una hoja de cálculo por computadora.

Cuando las fuerzas vertical y horizontal en la barrena se han calculado, se estima el peso sobre barrena, el cual es directamente proporcional a F_v . Por lo tanto:

$$W = \sum_1^{No} F_v \cos (\text{posición angular en el perfil}) \quad (\text{IV.4.1})$$

Por otro lado, el torque se relaciona con la fuerza horizontal de la siguiente manera:

$$M = \sum_1^{No} F_H dr \quad (\text{IV.4.2})$$

Después de que la barrena a trabajado un cierto tiempo, los cortadores sufren desgaste provocado por varios factores analizados en capítulos anteriores. Sin embargo, para hacer una estimación del volumen de desgaste, sólo se considera la abrasión debida al corte sin incluir el impacto.

Se desarrollaron dos modelos matemáticos para determinar el volumen de desgaste, que se describen en forma detallada en la Sección 4 del Apéndice A. La ecuación (IV.4.3) que se presenta a continuación, requiere solo del radio del cortador, la longitud desgastada y el

ángulo de ataque, para su cálculo.

$$V_D = \frac{\pi}{2 \sin \beta} \left\{ \left[-\frac{(2rx-x^2)^{3/2}}{3} \right] + \frac{r}{2} \left[(x-r)(2rx-x^2)^{1/2} + r^2 \sin^{-1} \frac{x-r}{|r|} \right] \right\} + \frac{\pi}{4} r^3 \quad (\text{IV.4.3})$$

En tanto que el otro modelo requiere de información adicional disponible en el campo, así como de datos estimados experimentalmente en laboratorio y reportados en la literatura. La ecuación resumida es la siguiente:

$$V_D = \frac{Nt}{A} (F_V h + F_H \pi r) \quad (\text{IV.4.4})$$

Los cortadores en una barrena PDC no se desgastan uniformemente, debido a que el trabajo ejercido por cada uno de ellos, dependerá de la posición radial en la cara de la barrena. Por esta razón para estimar el desgaste global de la barrena, se considera en este estudio un desgaste promedio, es decir, el desgaste que sufren los cortadores en la posición radial media.

Cuando el volumen de desgaste se ha estimado con la ecuación (IV.4.3), se puede calcular el tiempo para que este fenómeno ocurra, usando la ecuación (IV.4.4).

Como el análisis hecho es a nivel cortador, el desgaste total tendrá que integrarse con el número de cortadores que contenga la barrena.

El alcance del modelo no es extensivo para barrenas TSP o la perforación de formaciones duras con barrenas PDC, debido a que la acción de corte esta limitada por las suposiciones hechas al inicio del modelo.

V. RESULTADOS Y DISCUSION

V.1 EJEMPLO ILUSTRATIVO

A partir de la siguiente información disponible, se requiere predecir el peso sobre barrena y el torque ejercidos en una barrena PDC de 5 $\frac{1}{2}$ " de diámetro, con perfil de cono medio . Además considerando la información adicional, predecir el peso sobre barrena, el torque, el volumen de desgaste y el tiempo requerido para que ocurra el desgaste en la misma barrena, después de que ha perforado un cierto intervalo:

Información Disponible:

$$\theta = 30.$$

$$\beta = 15.$$

$$\mu = 0.1$$

$$\alpha = 14.$$

$$c = 3500 \text{ psi}$$

$$r = 0.66 \text{ cm}$$

$$h = 0.15 \text{ cm}$$

$$\text{No. de cortadores} = 26$$

Procedimiento:

Se determina β' con la ecuación (IV.2.5)

$$\beta' = 15 + (14/2) = 22. = 0.38379 \text{ radianes}$$

Se calcula ahora la relación (σ_1'/σ_p') con la ecuación (IV.2.7)

$$\frac{\sigma_1'}{\sigma_p'} = \frac{1}{2 \sin 30} [(1 + \sin 30) e^{2(0.38379) \tan 30} - (1 - \sin 30)] = 1.837$$

De la misma manera se calcula σ_2'/σ_p' con la ecuación (IV.2.8)

$$\frac{\sigma_2'}{\sigma_p'} = \frac{1 - \sin 30}{2 \sin 30} [e^{2(0.38379) \tan 30} - 1] = 0.297$$

También se calcula la relación σ_n'/σ_p' con la ecuación (IV.2.9)

$$\frac{\sigma_n'}{\sigma_p'} = \frac{1.837 + 0.297 + [(1.837 + 0.297)^2 - 4(1 + 0.1^2)(1.837)(0.297)]^{\frac{1}{2}}}{2(1 + 0.1^2)} = 1.816$$

Después se determina σ_p' con la ecuación (IV.2.10), así:

$$\sigma_p' = 2(3500)[(\cos 30)/(1 - \sin 30)] = 12124 \text{ psi} = 853.8 \text{ kg/cm}^2$$

Por lo tanto de la ecuación (IV.2.9), se tiene:

$$\sigma'_n = 22012.3 \text{ psi} = 1550.2 \text{ kg/cm}^2$$

Con el valor de σ'_n calculamos las fuerzas actuando en el cortador con las ecuaciones (IV.2.14 y 2.15); pero $bh = Ac$, por lo que usando los valores de la tabla de la Figura 1-3, podemos calcular F_v y F_H para la penetración establecida. Este procedimiento se llevó a cabo mediante el auxilio de una hoja de cálculo, cuyos resultados se ilustran en la tabla 3 de resultados.

Los cálculos también se realizaron para todas las penetraciones enlistadas en la tabla de la Figura 1-3 y los resultados obtenidos se resumen en las siguientes 6 hojas de cálculo (tablas 1,2,3,4,5 y 6).

La determinación del peso sobre barrena y de torque mostrados en los cálculos, son las condiciones a las que debe operar la barrena en el fondo cuando los cortadores son nuevos (afilados).

Cuando los cortadores se empiezan a desgastar por efecto de la abrasión al perforar, cambian las condiciones en el fondo del agujero, por lo que será necesario estimar el nuevo peso sobre barrena y torque ejercidos cuando los cortadores se han achatado una cierta longitud x , así como el volumen y el tiempo en que ocurre ese desgaste.

A continuación se ejemplifica el cálculo del peso sobre barrena, torque, tiempo y volumen desgastado a partir de la siguiente:

Información Adicional:

$$Z_s = 0.65 \times 10^{-19} \text{ pg}^2/\text{lb} = 1.0354 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{kg} \text{ (Ziaja)}^{23}$$

$$x = 0.05 \text{ cm}$$

$$\mu^* = 0.68 \text{ (arenisca)}$$

Procedimiento:

Con las relaciones establecidas, se calculan las fuerzas que actúan a nivel cortador (Figura 46). Para este desarrollo se usó también una hoja de cálculo por computadora para agilizar las determinaciones, cuyos resultados de fuerzas actuando en el cortador, peso sobre barrena y torque se muestran en las siguientes dos hojas de cálculo (tablas 7 y 8).

Una vez obtenidas las fuerzas totales actuando en la barrena, se procede a calcular el volumen de desgaste, utilizando para este efecto las ecuaciones de la Sección 4 del Apéndice A. De este modo tenemos:

$$V_D = \frac{\pi}{2 \sin 15} \left\{ \left[- \frac{((2)(.66)(.05) - (.05)^2)^{\frac{3}{2}}}{3} \right] + \frac{.66}{2} [(0.05 - .66) \right. \\ \left. ((2)(.66)(.05)^2)^{\frac{1}{2}} + .66^2 \sin^{-1} \frac{.05 - .66}{.66} \right] + \frac{\pi}{4} (.66)^3 \} = 0.00203 \text{ cm}^3$$

Conocido el volumen de desgaste, es necesario determinar el tiempo en que se lleva a cabo este proceso. Para tal efecto usamos también los modelos desarrollados en la Sección 4 del Apéndice A, así:

$$A = \frac{\mu}{Zs} = \frac{0.68}{1.03 \times 10^{-12}} = 6.6 \times 10^{11}$$

$$t = \frac{(0.00203)(6.6 \times 10^{11})}{200[(3784 \times 0.15) + (1976 \times \pi \times 0.66)]} = 1436 \text{ minutos} = 23.9 \text{ hrs.}$$

DETERMINACION DEL PESO SOBRE BARRENA Y TORQUE (BARRENAS PDC)

PERFIL DE CGMO MEDIO (26 CORTADGRES DE 1.32 cm DE DIAMETRO)

GATOS:BARRENA DE 5 1/2 pg., E.N.=1550 kg/cm², b= 15 grados, f=0.1, h=0.05 cm

Cortador	A.C. (ca2)	Fer. (ca)	V/rev(ca3)	Fnc (kg)	Fsc (kg)	Fvc (kg)	Fnc (Kg)	Grados v.	Radianes	Cos(ang)	Dist. (a)	TOR (kg-a)	FEB (Kg)
1	0.017344	0.66	0.01144740	17.58406	1.758406	6.249581	25.27220	4	0.069813	0.997564	0.0066	0.1687955	9.5316243
2	0.011344	0.69	0.01009865	17.58406	1.758406	6.249581	15.52979	6	0.104719	0.994521	0.0069	0.1471152	6.2153458
3	0.011344	1.18	0.01336658	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	5	0.104719	0.994521	0.0118	0.1950516	6.2153458
4	0.011344	1.46	0.01636305	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	10	0.174532	0.984607	0.0146	0.2413350	6.1546365
5	0.011344	1.73	0.01922608	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	10	0.174532	0.984607	0.0173	0.2595655	6.1546365
6	0.011344	2.02	0.02291601	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	15	0.261799	0.965925	0.0202	0.3337919	6.0366324
7	0.011344	2.29	0.02597904	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	15	0.261799	0.965925	0.0229	0.3785324	6.0366324
9	0.011344	2.56	0.02904207	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	20	0.349065	0.939692	0.0256	0.4231628	5.8725858
9	0.011344	2.83	0.03210510	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	20	0.349065	0.939692	0.0283	0.4677933	5.8725858
10	0.011344	3.11	0.03528158	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	24	0.418879	0.913545	0.0311	0.5140767	5.7092770
11	0.011344	3.36	0.03811772	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	25	0.436332	0.906307	0.0336	0.5554012	5.6640445
12	0.011344	3.63	0.04118075	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	26	0.453765	0.898774	0.0363	0.6000317	5.5170968
13	0.011344	3.88	0.04401589	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	28	0.488692	0.882947	0.0388	0.6413562	5.5180531
14	0.011344	4.14	0.04695647	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	32	0.558505	0.846048	0.0414	0.6843326	5.2999458
15	0.011344	4.37	0.04957572	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	33	0.575958	0.836670	0.0437	0.7223522	5.2417462
16	0.011344	4.61	0.05229842	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	38	0.663225	0.788910	0.0461	0.7620237	4.9247375
17	0.011344	4.85	0.05502111	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	39	0.680678	0.777145	0.0485	0.6016952	4.8568372
18	0.011344	5.07	0.05751691	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	39	0.680678	0.777145	0.0507	0.6380609	4.8568372
19	0.011344	5.31	0.06023961	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	41	0.715564	0.754709	0.0531	0.6777323	4.7166192
20	0.011344	5.51	0.06250652	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	47	0.820304	0.681998	0.0551	0.9107919	4.2622044
21	0.011344	5.72	0.06489058	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	47	0.820304	0.681998	0.0572	0.9455045	4.2622044
22	0.011344	5.92	0.06715979	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	48	0.837759	0.669130	0.0592	0.9786541	4.1817864
23	0.011344	6.11	0.06931526	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	58	1.012269	0.529919	0.0611	1.0099707	3.3117737
24	0.011344	6.31	0.07158417	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	59	1.029744	0.515038	0.0631	1.0430303	3.2187725
25	0.011344	6.48	0.07351274	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	60	1.047197	0.5	0.0648	1.0711509	3.1247908
26	0.011344	6.63	0.07521443	17.58406	1.758406	6.249581	16.52979	60	1.047197	0.5	0.0663	1.0959256	3.1247908

TOTALES: 0.306958

1.14556307

15.691637 135.99133

DETERMINACION DEL PESO SOBRE BARRERA Y TORQUE (BARRERAS FDC)

PESSIL DE COMO MEDIO (26 CORTADORES DE 1.32 cm DE DIAMETRO)

DATOS: BARRERA DE 5 1/2 eg., E.N.=1550 kg/cm², b= 15 grados, f=0.1, h=0.10 cm

Cortador	A.C. (ca2)	Fer. (ca)	V/rev (ca3)	Fnc (Kg)	Fsc (Kg)	Fvc (Kg)	Fhc (Kg)	Grados v. Radianes	Cos(ang)	Dist. (a) TOR	(Kg- μ FSB (Kg)	
1	0.047686	0.66	0.03147276	73.9133	7.39133	26.269644	69.481761	4	0.069813	0.997564	0.0066 0.458579 26.20565	
2	0.027685	0.39	0.02463965	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	6	0.104719	0.994521	0.0089 0.339016 15.16776	
3	0.027685	1.18	0.0326683	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	4	0.104719	0.994521	0.0118 0.475999 15.16779	
4	0.027685	1.46	0.0404291	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	10	0.174532	0.984807	0.0146 0.588948 15.01963	
5	0.027685	1.73	0.04769505	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	10	0.174532	0.984807	0.0173 0.697963 15.01963	
6	0.027685	2.02	0.0559237	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	15	0.261799	0.965925	0.0202 0.814846 14.73165	
7	0.027685	2.29	0.06339865	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	15	0.261799	0.965925	0.0229 0.923761 14.73165	
8	0.027685	2.56	0.0708736	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	20	0.349065	0.937692	0.0256 1.032676 14.33156	
9	0.027685	2.83	0.07834855	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	20	0.349065	0.937692	0.0283 1.141591 14.33156	
10	0.027685	3.11	0.08610035	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	24	0.418879	0.913545	0.0311 1.254540 13.93279	
11	0.027685	3.36	0.09360216	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	25	0.436032	0.906307	0.0336 1.355368 13.82240	
12	0.027685	3.63	0.10049655	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	26	0.453785	0.898794	0.0363 1.464303 13.70780	
13	0.027685	3.88	0.1074178	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	28	0.488692	0.882947	0.0389 1.565150 13.46612	
14	0.027685	4.14	0.1146159	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	32	0.558505	0.846048	0.0414 1.670032 12.93386	
15	0.027685	4.37	0.12098345	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	33	0.575958	0.838670	0.0437 1.762911 12.79084	
16	0.027685	4.61	0.12762785	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	38	0.663225	0.788010	0.0461 1.859625 12.01821	
17	0.027685	4.85	0.13427225	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	39	0.680678	0.777145	0.0485 1.956478 11.65251	
18	0.027685	5.07	0.1406295	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	39	0.680678	0.777145	0.0507 2.045194 11.85251	
19	0.027685	5.31	0.14700735	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	41	0.715584	0.754709	0.0531 2.141997 11.51032	
20	0.027685	5.51	0.15254435	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	47	0.820364	0.681999	0.0551 2.222675 10.40138	
21	0.027685	5.72	0.1583582	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	47	0.820364	0.681999	0.0572 2.307387 10.40138	
22	0.027685	5.92	0.1636952	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	48	0.837758	0.669130	0.0592 2.388065 10.20513	
23	0.027685	6.11	0.16915535	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	58	1.012290	0.529919	0.0611 2.464709 8.661975	
24	0.027685	6.31	0.17469235	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	59	1.029744	0.515028	0.0631 2.545386 7.855017	
25	0.027685	6.48	0.1795988	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	60	1.047197	0.5	0.0649 2.613963 7.625666	
26	0.027685	6.63	0.18355155	42.91175	4.291175	15.251333	40.338937	60	1.047197	0.5	0.0663 2.674471 7.625666	
TOTALES: 0.739811											2.79914221	40.78541 334.7905

DETERMINACION DEL PESO SOBRE BARRENA Y TORQUE (BARRENAS POC)

PERFIL DE CORDO MEDIO (26 CORTADOPES DE 1.32 cm DE DIAMETRO)

DATOS: BARRENA DE 5 1/2 pg., E.N.=1550 kg/cm², b= 15 grados, f=0.1, h=0.15 cm

Cortador	A.C.(cm2)	Fer.(ca)	Wrev(cm3)	Fnc (Kg)	Fsc (Kg)	Fvc (Kg)	Fnc (Kg)	Grados v.Radianes	Cos(ang)	Dist. (a)	TOR (Kg-m)	PSS (Kg)	
1	0.026651	0.55	0.05718766	134.30905	13.420905	47.75499	125.25643	4	0.069913	0.897564	0.0066	0.833292	47.41871
2	0.039651	0.39	0.03528939	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	5	0.104719	0.994521	0.0089	0.514117	21.72359
3	0.039651	1.19	0.04678619	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	6	0.104719	0.994521	0.0118	0.681735	21.72359
4	0.039651	1.46	0.05789046	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	10	0.174532	0.984807	0.0146	0.843503	21.51141
5	0.039651	1.73	0.06859423	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	10	0.174532	0.984807	0.0173	0.999493	21.51141
6	0.039651	2.02	0.08009502	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	15	0.261799	0.965925	0.0202	1.167039	21.09896
7	0.039651	2.29	0.09060079	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	15	0.261799	0.965925	0.0229	1.323029	21.06896
8	0.039651	2.56	0.10150456	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	20	0.349065	0.936692	0.0256	1.479019	20.52594
9	0.039651	2.85	0.11221233	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	20	0.349065	0.936692	0.0283	1.635010	20.52594
10	0.039651	3.11	0.12321461	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	24	0.419879	0.913545	0.0311	1.786778	19.95481
11	0.039651	3.36	0.13322736	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	25	0.426332	0.906507	0.0336	1.941213	19.79671
12	0.039651	3.63	0.14393313	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	26	0.453785	0.898794	0.0363	2.097234	19.53259
13	0.039651	3.88	0.15384588	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	28	0.486692	0.882947	0.0388	2.241639	19.26645
14	0.039651	4.14	0.16415514	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	32	0.585805	0.848048	0.0414	2.391852	18.52413
15	0.039651	4.37	0.17327467	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	33	0.575958	0.838670	0.0437	2.524733	18.31829
16	0.039651	4.61	0.18279111	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	38	0.666325	0.798910	0.0461	2.665391	17.21272
17	0.039651	4.86	0.19230735	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	39	0.680678	0.777145	0.0485	2.802049	16.97540
18	0.039651	5.07	0.20107057	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	39	0.680678	0.777145	0.0507	2.929152	16.97540
19	0.039651	5.31	0.21054661	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	41	0.715584	0.754709	0.0531	3.067810	16.48531
20	0.039651	5.51	0.21947701	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	47	0.820204	0.681598	0.0551	3.183359	14.89706
21	0.039651	5.72	0.22869037	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	47	0.820204	0.681598	0.0572	3.304685	14.89706
22	0.039651	5.92	0.23747332	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	48	0.837758	0.669130	0.0592	3.429233	14.61599
23	0.039651	6.11	0.24226761	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	58	1.012290	0.526919	0.0611	3.550004	11.57516
24	0.039651	6.31	0.25019781	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	59	1.029744	0.515038	0.0631	3.645553	11.25011
25	0.039651	6.48	0.25693848	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	60	1.047197	0.5	0.0648	3.743769	10.92162
26	0.039651	6.63	0.26286613	61.45905	6.145905	21.84325	57.774217	60	1.047197	0.5	0.0663	3.820430	10.92162
TOTALES:	1.077926		4.0216013									58.59017	469.5800

DETERMINACION DEL PESO SOBRE BARRENA Y TORQUE (BARRENAS PDC)

PERFIL DE COMO MEDIO (26 CORTADOPES DE 1.32 cm de DIAMETRO)

DATOS: BARRENA DE 5 1/2 pg., E.N.=1550 kg/cm², b= 15 grados, f=0.1, h=0.20 cm

Cortador	A.C. (ca2)	Per. (cm)	V/rev (ca3)	Fnc (Kg)	Fsc (Kg)	Fvc (Kg)	Fhc (Kg)	Grados v. Radianes	Cost(ang)	Dist. (a)	TGR (Kg-m)	FSB (kg)	
1	0.13201	0.66	0.0571266	204.6155	20.46155	72.72272	192.34759	4	0.069913	0.997564	0.0066	1.269494	72.54557
2	0.05501	0.11	0.0489589	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	6	0.104719	0.994521	0.0089	0.713364	30.13833
3	0.05501	1.18	0.0649118	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	6	0.104719	0.994521	0.0118	0.945809	30.13833
4	0.05501	1.46	0.0903146	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	10	0.174532	0.984607	0.0146	1.170229	29.84395
5	0.05501	1.73	0.0951673	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	10	0.174532	0.984607	0.0173	1.386652	29.84395
6	0.05501	2.02	0.1111202	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	15	0.261799	0.965925	0.0202	1.619097	29.27175
7	0.05501	2.29	0.1259729	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	15	0.261799	0.965925	0.0229	1.835511	29.27175
8	0.05501	2.56	0.1468256	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	20	0.349965	0.939692	0.0256	2.051925	28.47677
9	0.05501	2.83	0.1558783	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	20	0.349965	0.939692	0.0283	2.268339	28.47677
10	0.05501	3.11	0.1710611	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	24	0.418679	0.913545	0.0311	2.492768	27.68439
11	0.05501	3.36	0.1848336	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	25	0.436332	0.906307	0.0336	2.693151	27.46506
12	0.05501	3.63	0.1998863	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	26	0.453755	0.899794	0.0363	2.909565	27.23736
13	0.05501	3.88	0.2134368	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	28	0.488692	0.882947	0.0388	3.109949	26.75715
14	0.05501	4.14	0.2277414	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	32	0.558505	0.846048	0.0414	3.316347	25.99954
15	0.05501	4.37	0.2403937	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	33	0.575958	0.832670	0.0437	3.502700	25.41536
16	0.05501	4.61	0.2535961	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	36	0.663225	0.788010	0.0461	3.695068	23.89015
17	0.05501	4.85	0.2667985	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	39	0.666679	0.777145	0.0485	3.887436	23.55090
18	0.05501	5.07	0.2789007	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	39	0.666678	0.777145	0.0507	4.063773	23.55090
19	0.05501	5.31	0.2921031	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	41	0.715564	0.754709	0.0531	4.256141	22.67098
20	0.05501	5.51	0.3031051	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	47	0.820304	0.681998	0.0551	4.416448	20.66751
21	0.05501	5.72	0.3146572	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	47	0.820304	0.681998	0.0572	4.584770	20.66751
22	0.05501	5.92	0.3256592	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	48	0.837758	0.669130	0.0592	4.745077	20.27756
23	0.05501	6.11	0.3361111	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	58	1.012290	0.529919	0.0611	4.897368	16.05885
24	0.05501	6.31	0.3471131	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	59	1.029744	0.515038	0.0631	5.057675	15.60789
25	0.05501	6.48	0.3564648	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	60	1.047197	0.5	0.0648	5.193935	15.15217
26	0.05501	6.63	0.3647163	85.2655	8.52655	30.20434	80.153330	60	1.047197	0.5	0.0663	5.314165	15.15217

TOTALES: 1.50726

5.5864763

81.39877 685.7027

DETERMINACION DEL PESO SOBRE BARRERA Y TORQUE (BARRERAS FDC)

PERFIL DE CONO MEDIO (26 CORTADORES DE 1.32 cm DE DIAMETRO)

DATOS: BARRERA DE 5 1/2 pg., E.N.=1550 kg/cm², b= 15 grados, f=0.1, h=0.25 ca

Cortador	A.C. (ca2)	Fer. (ca)	V/rev(ca3)	Fnc (kg)	Fsc (kg)	Fvc (kg)	Fhc (kg)	Grados v.	Radianes	Cost(ang)	Dist. (m)	TOR (Yg-m)	PSB (Kg)
1	0.179483	0.66	0.11845878	278.19865	27.819865	98.37502	261.51899	4	0.069813	0.997564	0.0066	1.725025	99.63417
2	0.190483	0.89	0.05382987	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	6	0.104719	0.994521	0.0089	0.784338	33.13683
3	0.060483	1.18	0.07136994	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	6	0.104719	0.994521	0.0118	1.039908	33.13683
4	0.060483	1.46	0.06830518	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	10	0.174532	0.994807	0.0146	1.286666	32.81316
5	0.060483	1.73	0.10463559	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	10	0.174532	0.994807	0.0173	1.524612	32.81316
6	0.060483	2.02	0.12217566	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	15	0.261799	0.965925	0.0202	1.780182	32.18402
7	0.060483	2.29	0.13850607	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	15	0.261799	0.965925	0.0229	2.018128	32.18402
8	0.060483	2.56	0.15483648	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	20	0.349065	0.939692	0.0256	2.256073	31.30995
9	0.060483	2.83	0.17116689	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	20	0.349065	0.939692	0.0283	2.494018	31.30995
10	0.060483	3.11	0.18810213	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	24	0.418879	0.913545	0.0311	2.740776	30.42874
11	0.060483	3.36	0.20322288	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	25	0.436332	0.906307	0.0336	2.951096	30.19759
12	0.060483	3.63	0.21955329	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	26	0.453765	0.898794	0.0363	3.189041	29.94724
13	0.060483	3.88	0.23467404	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	28	0.488692	0.882947	0.0388	3.419361	29.41924
14	0.060483	4.14	0.25039962	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	32	0.558505	0.848048	0.0414	3.548493	28.25641
15	0.060483	4.37	0.26431071	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	33	0.575958	0.838670	0.0437	3.651187	27.94396
16	0.060483	4.61	0.27882663	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	38	0.663225	0.798010	0.0461	4.062694	26.25601
17	0.060483	4.85	0.29334255	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	39	0.680678	0.777145	0.0465	4.274201	25.89400
18	0.060483	5.07	0.30664881	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	39	0.680678	0.777145	0.0507	4.468082	25.89400
19	0.060483	5.31	0.32116473	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	41	0.715584	0.754709	0.0531	4.677589	25.14643
20	0.060483	5.51	0.33326133	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	47	0.820304	0.681998	0.0551	4.855845	22.72374
21	0.060483	5.72	0.34596276	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	47	0.820304	0.681998	0.0572	5.040913	22.72374
22	0.060483	5.92	0.35805936	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	48	0.837758	0.669130	0.0592	5.217169	22.29500
23	0.060483	6.11	0.36955113	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	58	1.012290	0.529919	0.0611	5.384612	17.65656
24	0.060483	6.31	0.38164773	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	59	1.029744	0.515038	0.0631	5.560868	17.16073
25	0.060483	6.48	0.39192984	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	60	1.047197	0.5	0.0648	5.710685	16.65967
26	0.060483	6.63	0.40100229	93.74865	9.374865	33.31935	88.127865	60	1.047197	0.5	0.0663	5.842877	16.65967

TOTALES: 1.691558

6.1549429

89.82745 772.7949

DETERMINACION DEL PESO SOBRE BARRERA Y TORQUE (BARRERAS FDC)

PERFIL DE CONO MEDIO (26 CORTADORES DE 1.32 cm DE DIAMETRO)

DATOS: BARRERA DE 5 1/2 pg., E.N.=1550 kg/cm², b= 15 grados, f=0.1, h=0.30 cm

Cortador	A.C. (ca)	Per. (ca)	V/rev (ca)	Fnc (Kg)	Fsc (Kg)	Fvc (Kg)	Fnc (kg)	Grados v.	Radianes	Cos(ang)	Dist.	(a) TOR	(Kg-m)	PSB (kg)
1	0.234209	0.66	0.15457794	363.02395	36.302395	129.0229	341.25852	4	0.069813	0.997584	0.0066	2.252306	128.7086	
2	0.080209	0.89	0.07138601	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	6	0.104719	0.994521	0.0089	1.040142	43.94411	
3	0.080209	1.18	0.09464662	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	8	0.104719	0.994521	0.0118	1.379065	43.94411	
4	0.080209	1.46	0.11710514	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	10	0.174532	0.984607	0.0146	1.706301	43.51488	
5	0.080209	1.73	0.13876157	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	10	0.174532	0.984607	0.0173	2.021850	43.51488	
6	0.080209	2.02	0.16202218	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	15	0.261799	0.965925	0.0202	2.360773	42.58056	
7	0.080209	2.29	0.18367861	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	15	0.261799	0.965925	0.0229	2.676322	42.58056	
8	0.080209	2.56	0.20533504	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	20	0.349065	0.935692	0.0256	2.991671	41.52142	
9	0.080209	2.83	0.22679147	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	20	0.349065	0.935692	0.0283	3.307420	41.52142	
10	0.080209	3.11	0.24944999	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	24	0.415879	0.913545	0.0311	3.634656	40.36607	
11	0.080209	3.36	0.26950224	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	25	0.436332	0.906307	0.0336	3.926631	40.04627	
12	0.080209	3.63	0.29115867	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	25	0.436332	0.906307	0.0363	4.242380	39.71427	
13	0.080209	3.88	0.31121092	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	29	0.488692	0.882947	0.0388	4.534555	39.01407	
14	0.080209	4.14	0.33206526	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	32	0.556505	0.843048	0.0414	4.836417	37.47200	
15	0.080209	4.37	0.35051333	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	33	0.575958	0.838670	0.0437	5.107218	37.05764	
16	0.080209	4.61	0.36765349	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	38	0.663225	0.786010	0.0461	5.387706	34.81918	
17	0.080209	4.85	0.38901345	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	39	0.680678	0.777145	0.0485	5.668194	34.33910	
18	0.080209	5.07	0.40665963	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	39	0.680678	0.777145	0.0507	5.925306	34.33910	
19	0.080209	5.31	0.42590979	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	41	0.715564	0.754709	0.0531	6.205796	33.34772	
20	0.080209	5.51	0.44195159	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	47	0.820304	0.681998	0.0551	6.435356	30.13489	
21	0.080209	5.72	0.45879548	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	47	0.820304	0.681998	0.0572	6.684963	30.13489	
22	0.080209	5.92	0.47483728	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	48	0.837758	0.669120	0.0592	6.918703	29.56632	
23	0.080209	6.11	0.49007699	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	58	1.012290	0.525919	0.0611	7.140756	23.41510	
24	0.080209	6.31	0.50611879	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	59	1.029744	0.515038	0.0631	7.374496	22.75756	
25	0.080209	6.48	0.51975432	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	60	1.047197	0.5	0.0648	7.575175	22.09308	
26	0.080209	6.63	0.53178567	124.32395	12.432395	44.18617	116.86999	60	1.047197	0.5	0.0663	7.748460	22.09308	

TOTALES: 2.239434

B.17307167

119.0872 1022.741

DETERMINACION DEL PESO SOBRE BARRENA Y TORQUE (BARRENAS PDC CON DESGASTE)

PERFIL DE CONO MEDIO (26 CONTADORES DE 1.32 cm DE DIAMETRO)

DATOS: BARRENA DE 5 1/2 eg, E.N. = 1550 kg/cm², b = 15 grados, h = 0.15 cm, x = 0.05

Contador	A.C. (ca)	Per. (ca)	V/rev. (cm ³ /Fnc)	(Kg)	Fsc (Kg)	Fvc (Kg)	Fhc (Kg)	Grados v.
1	0.066651	0.66	0.057190	134.3105	13.43105	44.41412	127.4641	4
2	0.039651	0.89	0.035290	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	6
3	0.039651	1.18	0.046789	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	6
4	0.039651	1.46	0.057891	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	10
5	0.039651	1.73	0.068597	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	10
6	0.039651	2.02	0.080096	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	15
7	0.039651	2.29	0.090802	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	15
8	0.039651	2.56	0.101509	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	20
9	0.039651	2.83	0.112215	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	20
10	0.039651	3.11	0.123317	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	24
11	0.039651	3.36	0.133230	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	25
12	0.039651	3.63	0.143936	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	26
13	0.039651	3.88	0.153845	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	28
14	0.039651	4.14	0.164159	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	32
15	0.039651	4.37	0.173279	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	33
16	0.039651	4.61	0.182795	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	38
17	0.039651	4.85	0.192312	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	39
18	0.039651	5.07	0.201025	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	39
19	0.039651	5.31	0.210551	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	41
20	0.039651	5.51	0.218482	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	47
21	0.039651	5.72	0.226809	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	47
22	0.039651	5.92	0.234739	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	48
23	0.039651	6.11	0.242273	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	58
24	0.039651	6.31	0.250203	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	59
25	0.039651	6.4E	0.256944	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	60
26	0.039651	6.63	0.262892	61.46053	6.146053	20.32391	58.32761	60

TOTALES: 1.077950

4.0211%

Radianes	C05	Dist (m)	Fvd (kg)	Fhd (kg)	Fvt (Kg)	Fht (Kg)	TDR (kg-m)	PSB (Kg)
0.069813	0.997564	0.0666	122.7073	12.27073	167.1214	139.7348	0.92224954	166.7143
0.104719	0.994521	0.0089	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	0.62832523	142.2476
0.104719	0.994521	0.0118	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	0.63306041	142.2476
0.174532	0.984807	0.0146	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	1.03073577	140.8582
0.174532	0.984807	0.0173	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	1.22135129	140.8582
0.261799	0.965925	0.0202	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	1.42608648	138.1575
0.261799	0.965925	0.0229	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	1.61670200	138.1575
0.349065	0.939692	0.0256	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	1.80731752	134.4053
0.349065	0.939692	0.0283	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	1.99793304	134.4053
0.418679	0.913545	0.0311	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	2.19560839	130.6655
0.436332	0.906307	0.0336	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	2.37210424	129.6303
0.453785	0.896794	0.0363	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	2.56271976	126.5556
0.488692	0.882947	0.0388	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	2.73921561	126.2890
0.558505	0.848048	0.0414	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	2.92277130	121.2973
0.575958	0.839670	0.0437	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	3.08514748	119.9560
0.663225	0.788010	0.0461	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	3.25458350	112.7101
0.680678	0.777145	0.0485	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	3.42401952	111.1561
0.680678	0.777145	0.0507	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	3.57533557	111.1561
0.715564	0.754709	0.0531	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	3.74677186	107.9470
0.820304	0.681996	0.0551	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	3.88996657	97.54705
0.820304	0.681998	0.0572	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	4.03822508	97.54705
0.837756	0.669130	0.0592	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	4.17542176	95.70656
1.012290	0.529919	0.0611	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	4.31355861	75.79499
1.029744	0.515036	0.0631	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	4.45475529	73.66652
1.047197	0.5	0.0646	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	4.57477247	71.51560
1.047197	0.5	0.0663	122.7073	12.27073	143.0312	70.59834	4.68066998	71.51560

71.4954110 3060.705

V.2 EFECTO DEL PERFIL EMPLEADO

En seguida se presentan los resultados obtenidos al comparar el peso sobre barrena y el torque aplicados a tres perfiles diferentes de barrena actuando en una formación de arenisca Figuras 47 y 48.

La Figura 47 ilustra la relación del peso sobre barrena vs. ritmo de penetración para una barrena PDC, con tres perfiles distintos actuando en una formación de Arenisca y con una velocidad de rotación de 120 RPM. Observamos que el perfil profundo requiere menor peso sobre barrena que el perfil somero para un mismo ritmo de penetración. Si analizamos ahora la Figura 48, vemos que el perfil profundo requiere mayor torque que el perfil medio y éste a su vez requiere mayor torque que el perfil somero para un ritmo de penetración constante. De manera similar se muestran los resultados comparativos al aplicar el peso sobre barrena y torque en dos formaciones diferentes Figuras 49 y 50.

V.3 EFECTO DE LA DUREZA DE LA ROCA

La gráfica de la Figura 49, ilustra que el peso sobre barrena aplicado a una barrena PDC será mayor para formaciones más duras (Arenisca) en relación a otras menos duras (Lutita) bajo las mismas condiciones de operación. Asimismo en la Figura 50 se comprueba que la Arenisca requiere mayor torque que la Lutita, bajo el mismo marco de condiciones.

V.4 EFECTO DEL DESGASTE

Finalmente analizando las gráficas de las Figuras 51 y 52, probamos que al irse desgastando la barrena por efecto de la abrasión, se requiere aumentar substancialmente el peso sobre barrena y el torque, para mantener un ritmo de penetración dado.

Los ritmos de penetración usados son congruentes con casos reales reportados en México. Tal es el caso de los pozos Uech-2 y Pionero (entre otros), cuyos ritmos son de 9 y 8 m/hr respectivamente.

Cabe hacer mención que el empleo de barrenas PDC en México, ofrece muchas posibilidades de éxito, ya que las pruebas realizadas en algunos pozos así lo demuestran. Por ejemplo el pozo Uech-2 que utilizó una barrena PDC, perforó 1720 m en 204 hr, constituye un caso feaciente del buen desempeño de estas herramientas.

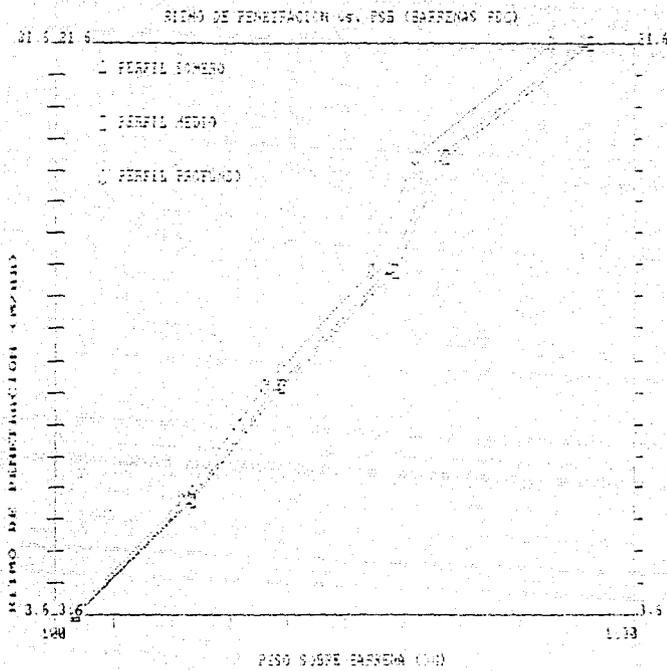


FIGURA 47

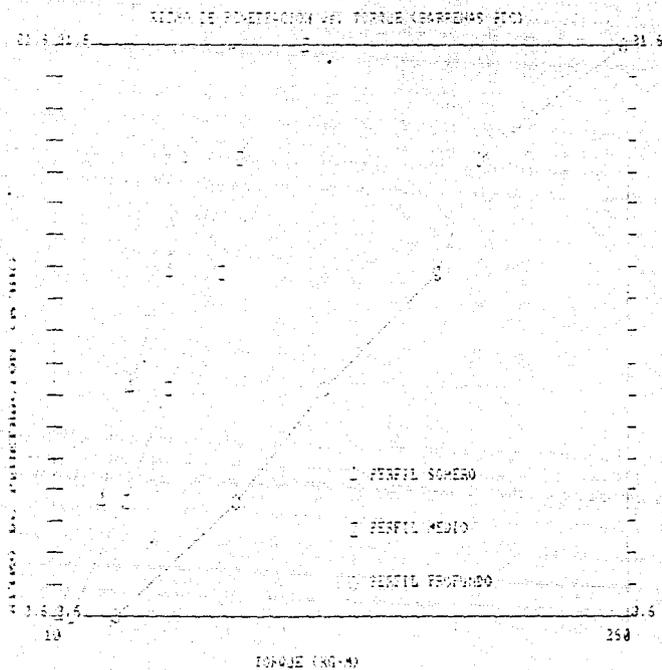


FIGURA 48

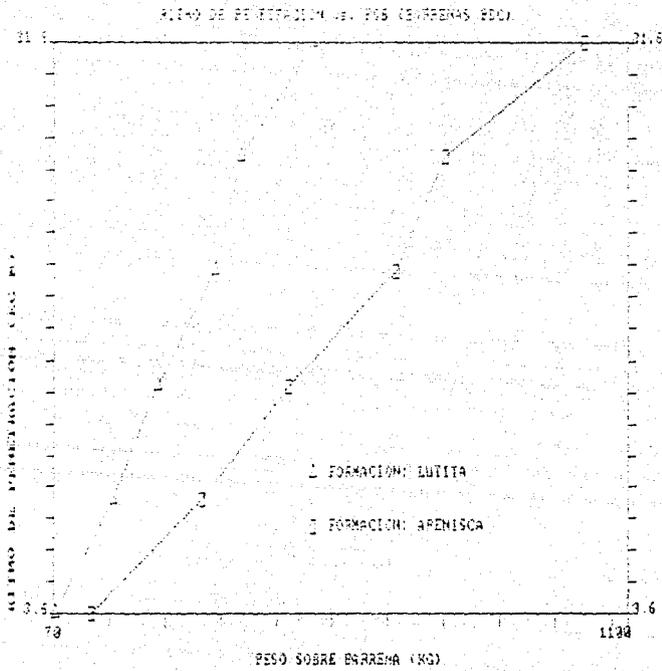


FIGURA 49

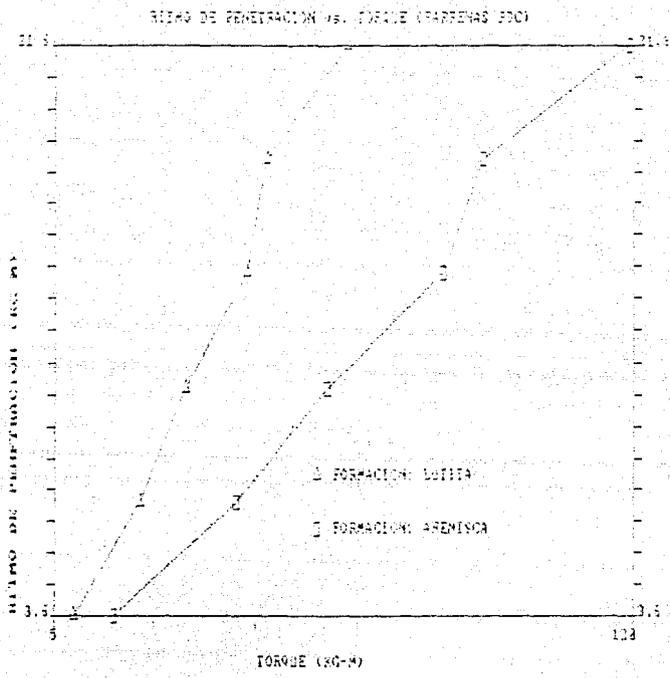


FIGURA 50

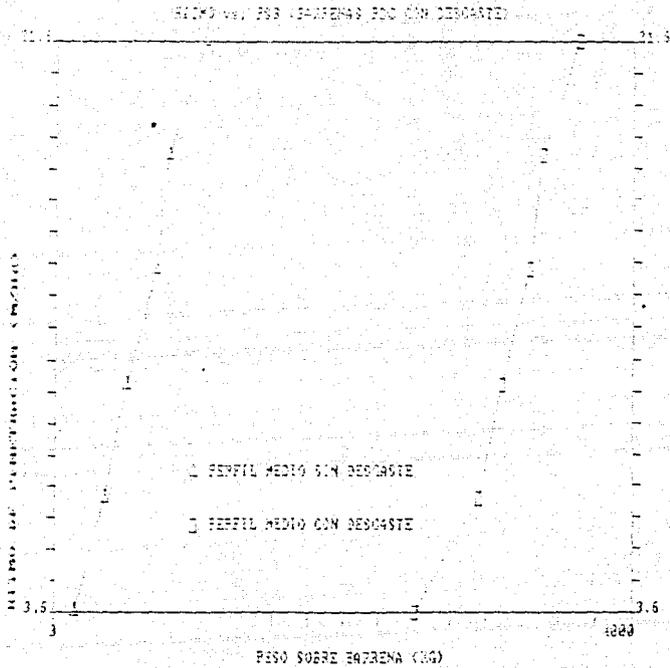


FIGURA 51

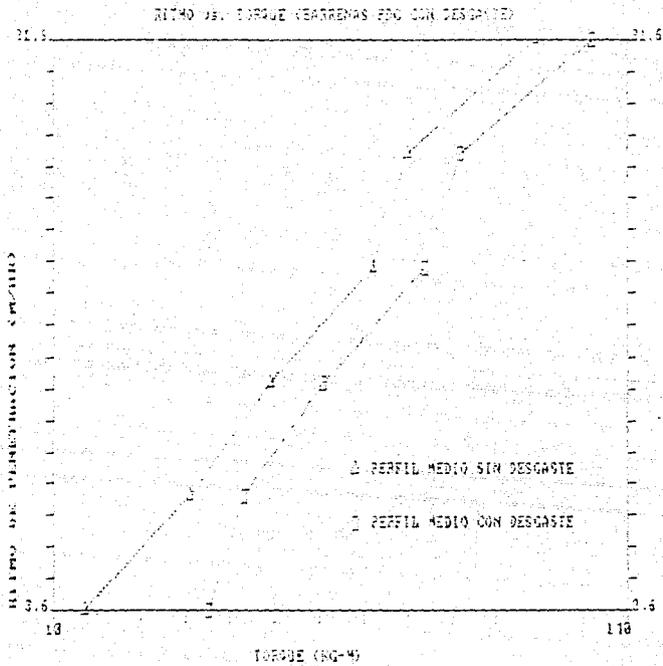


FIGURA 52

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES:

A. En base al estudio de la Literatura relacionada con el empleo de barrenas PDC se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Las barrenas PDC trabajan adecuadamente, en formaciones suaves, firmes y medio duras, con características no abrasivas ni gomosas.

2. La temperatura de estabilidad de barrenas PDC, está limitada a 700°C (1292 °F). A una temperatura mayor a la indicada el ritmo de desgaste de los cortadores PDC se incrementa, debido a la presencia de Cobalto, que promueve la grafitación de los cortadores, reduciendo mediante este mecanismo la dureza de los mismos.

3. Es importante hacer una cuidadosa selección de la barrena, ya que el éxito de su aplicación, dependerá en gran medida del tipo de barrena

elegida.

4. El aumento en la conicidad del perfil de la barrena, incrementa la tendencia al giro. El fenómeno de giro de la barrena, es la causa predominante de daño por impacto. Por lo tanto, la resistencia al impacto está limitada y determinada por la por la orientación de los cortadores, el ángulo de ataque de los mismos y el perfil de la barrena.

5. El peso aplicado a una barrena PDC es comparativamente menor que el aplicado a una TSP, la cuál a su vez, requiere menor peso que una barrena de diamante.

6. Las barrenas PDC son por sus cualidades, excelentes candidatos para ejecutar la desviación en pozos direccionales.

B. Después de analizar los resultados obtenidos con el modelo desarrollado, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. El peso sobre barrena aplicado es mayor en perfiles someros que para perfiles profundos. El torque en la barrena PDC es mayor para perfiles profundos que para someros.

2. Considerando un perfil de barrena dado, se requiere mayor peso sobre barrena para perforar una Arenisca que una Lutita. Del mismo modo, se necesita mayor torque en una Arenisca que en una Lutita.

3. El desgaste de la barrena generado al perforar, requiere de mayor peso y mayor torque, para mantener un ritmo de penetración constante.

RECOMENDACIONES.

A. Recomendaciones durante la operación de la barrena:

1. Es muy importante evitar la impactación de la barrena, tanto en su manejo como en su operación, para obtener un mayor rendimiento de las mismas

2. Es conveniente utilizar fluidos de perforación base aceite, para evitar o reducir el embolamiento de las barrenas PDC.

3. En formaciones duras y abrasivas es recomendable utilizar barrenas TSP, ya que son térmicamente estables a 1200 °C.

4. Cuando se utilizan turbinas o motores de fondo, se recomienda emplear barrenas PDC, para el tipo de formación adecuada.

B. Recomendaciones para la aplicación del modelo:

1. Considerando que la mayor parte de los pozos petroleros en México, atraviesan grandes intervalos de formación Lutítica, es recomendable utilizar barrenas PDC en forma más intensiva, debido a que el costo por metro perforado se reduce considerablemente.

2. El modelo desarrollado es aplicable a barrenas PDC, considerando que los cortadores inician su acción con cierta penetración, alcanzando resultados aceptables en su etapa experimental, por lo que se recomienda continuar su desarrollo tomando en cuenta el estado inicial sin penetración, ajustándolo a las condiciones particulares de los pozos mexicanos.

3. Dado que el PSB y el Torque están en función del perfil de la barrena, del número, posición, ángulo, tamaño y densidad de los cortadores, es posible utilizar la variación del modelo para desarrollar diseños mecánicos apropiados.

VII. NOMENCLATURA

- A, Trabajo requerido por unidad de volumen
- A_1 , Area de corte del primer cortador
- A_2 , Area de corte del segundo cortador en adelante
- AC, Area de corte del coratador
- A_w , Area desgastada del cortador
- A_{wd} , Area desgastada del cortador adimensional
- A_w' , Ritmo de desgaste promedio del cortador
- a, Exponente de velocidad de rotación adimensional
- a_n , Constantes adimensionales de la barrena
- B_n , Constantes de interacción roca-cortador adimensional
- b, Longitud del cortador
- b_n , Constantes adimensionales de la barrena
- B_f , Factor de la barrena (>1 lentamente, <1 rápidamente)
- c, Resistencia cohesiva de la roca
- C_n , Constantes
- D, Diámetro de la barrena

d , Exponente d
 DTOR, Torque en el fondo
 DWOB, Peso en el fondo
 d_c , Diámetro del cortador
 d_r , Distancia radial del cortador
 d_v , Ancho del cortador
 d_{ce} , Profundidad efectiva de corte
 E_B , Eficiencia de la barrena
 E_n , Constantes del modelo de diagnóstico de perforación
 E_D , Eficiencia de perforación
 $E_{D \text{ aparente}}$, Eficiencia aparente de la formación
 E_{Dn} , Eficiencia normalizada de perforación
 F , Carga compresiva
 f , Achatamiento del cortador
 f' , Función de respuesta térmica
 F_c , Fuerza del cortador
 F_D , Grupo adimensional del ritmo de penetración
 F_{fc} , Fuerza de fricción efectiva en el área del cortador
 F_{fv} , Fuerza efectiva de fricción en el área desgastada
 F_v , Fuerza vertical al cortador
 F_{vc} , Fuerza vertical de corte
 F_{vd} , Fuerza vertical de desgaste
 F_H , Fuerza horizontal al cortador
 F_{HC} , Fuerza horizontal de corte
 F_{HD} , Fuerza horizontal de desgaste
 F_N , Fuerza normal al cortador
 F_{NC} , Fuerza normal de corte
 F_{ac} , Fuerza de corte por cizallamiento

F_T , Fuerza tangencial
 f_1 , Definición de la función de distribución de la carga a través de la cara de la barrena PDC
 FORM, Registro de las propiedades de la formación basada en la relación (τ/σ)
 FORS, Esfuerzo aparente de la formación
 FLAT, Clasificación de los cortadores desgastados en 1/8 avos
 G_1 , Constante de conversión de unidades (0.7589 * 60/hr min)
 G_2 , Constante de conversión de unidades (3.8637 s/unidades)
 $G(\alpha)$, Una función de α
 h , Profundidad de penetración del cortador por revolución
 I , Constante de interferencia de cortadores, adimensional
 K , Constante de perforabilidad
 k_1 , Constante de proporcionalidad entre el peso sobre barrena y la fuerza normal, adimensional
 k_2 , Constante de desgaste del cortador
 k_3 , Constante de proporcionalidad entre el ritmo de penetración y la profundidad del cortador, adimensional
 K_{ht} , Conductividad térmica de la roca
 L , Longitud de desgaste del cortador
 L_p , Penetración del cortador por revolución
 M , Torque de la barrena
 MWD, Medición mientras se perfora
 $n(r)$, Densidad de los cortadores adimensional
 n , Exponente del modelo de perforación
 N , Velocidad de rotación
 N_{at} , Velocidad de rotación estandar
 p , Presión de confinamiento

r , Radio
 R , Ritmo de penetración
 r_b , Radio de la barrena
 R_c , Resistencia de la roca al corte
 R_p , Resistencia de la roca a la presión
 R_D , Ritmo de penetración adimensional
 R_s , Esfuerzo relativo de la roca
 R_{st} , Ritmo de penetración estandar
 M , Torque de la barrena
 T , Trabajo
 T_D , Torque adimensional
 $T_{D \text{ lutita}}$, Torque adimensional en lutitas
 $T_{D \text{ lutita } 0}$, Torque adimensional en lutitas para una bna. nueva
 T_H , Trabajo horizontal
 T_s , Torque de un solo cortador
 T_V , Trabajo vertical
 T_w , Temperatura de desgaste de los cortadores PDC
 T_{fl} , Temperatura de enfriamiento del fluido
 U_D , Función de desgaste adimensional del cortador
 V , Velocidad de corte
 V_D , Volumen de desgaste del cortador
 W , Peso sobre barrena
 W_0 , Peso sobre barrena inicial
 W_{st} , Peso sobre barrena estandar (4000 lbs/pg. de diámetro de barrena)
 w , Desgaste lineal adimensional del cortador
 x , Desgaste lineal del cortador
 x_c , Profundidad del cortador por revolución

- Zs, Índice de abrasividad de la roca
- β , Angulo de ataque
- β' , Angulo de abanico
- α , Angulo definido en la Figura 50
- α_c , Angulo de corte
- α_a , Angulo de corte del fondo
- γ , Angulo de ataque lateral
- θ , Angulo de fricción interna
- ϕ , Angulo entre los planos horizontal y normal
- μ , Coeficiente de fricción entre la superficie del cortador y la roca, adimensional
- η , Localización radial de los cortadores
- σ , Esfuerzo de penetración (dureza de la roca)
- σ_n ó σ_θ , Esfuerzo normal al plano de falla
- σ_n' , Esfuerzo normal en la interfase roca cortador
- σ_p' , Esfuerzo compresivo de la roca a la presión de confinamiento
- σ_o' , Esfuerzo compresivo sin confinar
- σ_1 , Esfuerzo principal (carga compresiva)
- σ_2 ó σ_3 , Esfuerzo secundario (presión de confinamiento)
- τ ó $\tau_{r\theta}$, Esfuerzo cortante
- λ' , Angulo definido en la Figura 1.1
- λ , Relación adimensional constante R/N a h
- ψ , Angulo definido en las Figuras 41 y 42

VIII. BIBLIOGRAFIA

1. Bourgoyne, A.T., Millheim, K.K., Chenevert, M.E., Young, F.S., "Applied Drilling Engineering", SPE Textbook Series 1986.
2. Winters, W.J., Doiron, H.H., "The 1987 IADC Fixed Cutter Bit Classification System", SPE/IADC 16142, Drilling Conference, March 15-18, 1987, New Orleans.
3. Eastman Christensen, Proven Drilling Performance, 1989.
4. Feenstra, R., "Status of Polycrystalline Diamond Compact Bits: Part 1 Development", Journal of Petroleum technology, June 1988.
5. Ortega, A. and Glowka, D.A., "Fractional Heating and Convective Cooling of Polycrystalline Diamond Drag Tools During Rock Cutting", SPEJ, April 1984.
6. Glowka, D.A., "Implications of Thermal Wear Phenomena for PDC Bit Design and Operation", paper SPE 14222, presented at the 1985 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas.
7. Zijsling, D.H., "Analysis of Temperature Distribution and

Performance of PDC Bits Under Field Drilling Conditions", paper SPE 13260 presented at the 1984 SPE Annual Conference and Exhibition, Houston TX.

8. Sneddon, M.V. and Hall, D.R., "Polycrystalline Diamond: Manufacture, Wear Mechanisms and Implications for Bit Design", paper SPE 17006 presented at the 1987 spe Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas.

9. Feenstra, R. and Zijssling, D.H., "Effect of Bit Performance in Relation to the Rock Destruction Mecanisms at Depth", paper SPE 13205 presented at the 1984 SPE annual Technical Conference and Exhibition, Houston, TX.

10. Zijssling, D.H., "Single-Cutter Testing - A Key for PDC Bit Development", paper SPE 16529 presented at the SPE Offshore Europe Conference, Aberdeen.

11. Clark, D.A., Coolidge, R.B., Kelety, J.T., Kerr, J., "Application of the New IADC Dull Grading System for Fixed Cutter Bits", SPE/IADC 16145 Drilling Conference, March, 1987 New Orleans.

12. Maurer, W.C., "Laboratory Testing of High-Pressure, High Speed PDC Bits", paper SPE 15615 presented at the 1986 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans.

13. Glowka, D.A., "Use of Single - Cutter in the Analysis of PDC Bit Designs", paper SPE 15619 presented at the 1986 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans.

14. Warren, T.M., Brett, J.F., Sinor, L.A., "Development of a Whirl-Resistant Bit", paper SPE 19572 presented at the 64h Annual technical Conference and Exhibition, San Antonio TX, 1989.

15. Brett, J.F., Warren, T.M. and Bher, S.M., "Bit Whirl - A New Theory of PDC Bit Failure", paper SPE 19571, presented at the 1989 SPE

Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio TX.

16. Koskie, E.T. and Appen, H.E., "A PDC Solution to Drilling Sticky Formations with Noninhibited Water - Base Drilling Fluid: Experience in the Provincia Field in Colombia", paper SPE 14430 presented at the 1985 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas.

17. Feenstra, R. "Status of Polycrystalline - Diamond Compact Bits: Part 2 - Applications, Journal of Petroleum Technology, July 1988.

18. Perry, C.J., "Directional Drilling with Pdc Bits in the Golf of Thailand", paper SPE 15616 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans.

19. Cheatham, J.B.Jr., "An Analytical Study of Rock Penetration By a Single Bit Tooth", Eighth Annual Drill. Blast. Symp. U. of Minnesota, 1958.

20. Cheatham, B.J.Jr., "Rock-Bit Tooth Friction Analysis", SPE, Oct., 1963.

21. Cheatham, B.J.Jr., "Indetation Analysis for Rocks Having a Parabolic Yield Envelope", Shell Development Company, Publication No.356, Nov, 1963.

22. Ziaja, M.B., "Mathematical Model of Polycrystalline Diamond Bit Drilling Process and Its Practical Application", paper SPE 14217 presented at the 1985 Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas NV.

23. Padilla, R.J. y S., "Apuntes de Geologia Estructural", División de Estudios de Posgrado Facultad de Ingeniería U.N.A.M. 1987.

24 Warren, T.M., Sinor, A., "Drag Bit Performance Modeling", paper SPE 15618 presented at the 1986 Annual Technical Conference and

Exhibition, New Orleans LA.

25. Falconer, I.G., Burgess, T.M., Sheppard, M.C., "Separating Bit Lithology Effects from Drilling Mechanisms Data", paper SPE/IADC 17191 presented at the 1988 Drilling Conference in Dallas TX.

26. Kuru, E., Wojtanowicz, A.K., "A Method for Detecting In-situ PDC Bit Dull and Lithology Change", paper IADC/SPE 17192 presented at the 1988 Drilling Conference, TX.

27. Goodman, Richard E., (1989), "Introduction to Rock Mechanics", Second Edition, University of California at Berkeley.

IX. APENDICES

MODELO DE RIOS J. Y GARCIA G.

SECCION 1. CALCULO DE LAS AREAS DE CORTE

A) Area de corte del primer cortador.

Se establecen los parámetros base que son: radio y penetración del cortador como lo ilustra la Figura 1.1. En seguida se calcula el área de corte con las siguientes relaciones:

$$y = r - h$$

$$b = [(r^2 - y^2)^{\frac{1}{2}}] 2$$

$$\text{sen } (\lambda'/2) = (b/2)/r$$

$$\lambda' = 2 \text{ arc sen } \{(b/2)/r\}$$

$$A_1 = \frac{\pi r^2 \lambda'}{360} - \frac{b(r-h)}{2}$$

B) Area de corte del segundo cortador en adelante.

Se calcula el área de intersección que se ilustra en la Figura 1.2, siguiendo el procedimiento mostrado a continuación:

Se calcula el área formada por los puntos a, b, c, Figura 1.2

$$A_t = ab \times bc$$

Se calcula el área de la cuerda formada por los puntos a, c, d, en la misma Figura 1.2

$$ac = ((ab)^2 + (bc)^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$A_c = \frac{\pi r^2 N \cdot (ac)(r-h)}{360 \quad 2}$$

El área de intersección será:

$$A_I = A_t + A_c$$

Finalmente se determina el área de corte del segundo cortador en adelante, así:

$$A_2 = A_1 - A_I$$

Los cálculos de las áreas se repiten tantas veces como cambien los parámetros base.

Usando el procedimiento establecido en este Apéndice se calcularon las áreas de corte de los cortadores de 0.66 cm de radio de una barrena PDC, cuyas profundidades de corte y resultados se ilustran en la tabla de la Figura 1.3.

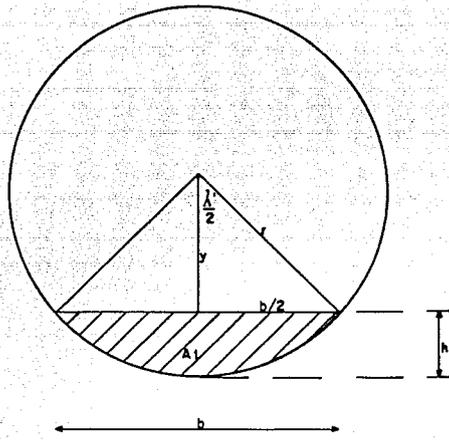


FIGURA 1.1

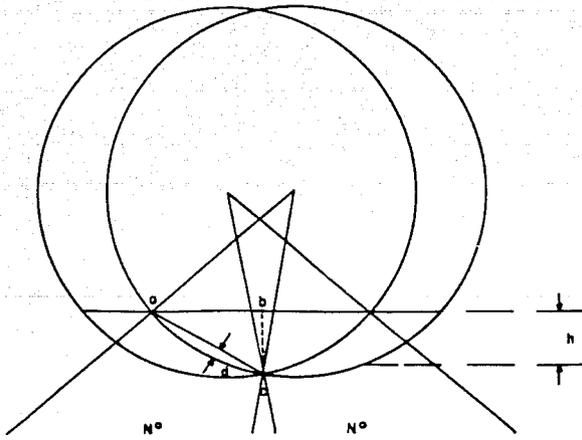


FIGURA 1.2

DISTRIBUCION DEL AREA DE COSTE (PARTIDAS FIJAS)

PRIMER COSTADOR

PRECIO	CONTRIBUCION	CONTRIBUCION	CONTRIBUCION	CONTRIBUCION	CONTRIBUCION	CONTRIBUCION
0.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.66	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0.66	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
0.66	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
0.66	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
0.66	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

SEGUNDO COSTADOR EN ADELANTO

PRECIO	CONTRIBUCION	CONTRIBUCION	CONTRIBUCION	CONTRIBUCION	CONTRIBUCION	CONTRIBUCION
0.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.66	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0.66	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
0.66	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
0.66	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
0.66	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

FIGURA 1.3

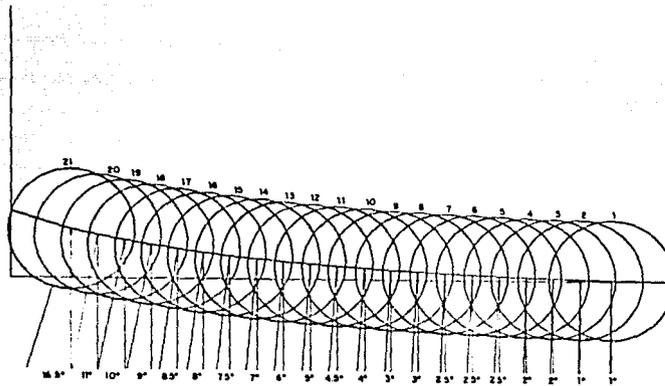
SECCION 2 PERFILES DE BARRENAS CON CORTADORES Y POSICIONES ANGULARES.

Se presentan tres perfiles de barrenas, que a juicio del autor son los más representativos del arreglo matricial de nueve. Se determinó la cantidad de cortadores necesarios para obtener una huella del perfil lisa, usando cortadores de 0.66 cm de radio, considerados en la literatura como de tamaño estandar. Al mismo tiempo se determinó la posición angular de cada uno de los cortadores en cada perfil de barrena.

Los perfiles desarrollados en esta Sección fueron utilizados también para determinar la posición (distancia) radial de cada uno de los cortadores en cada perfil propuesto.

Los tres perfiles propuestos se ilustran en las Figuras 2.1, 2.2 y 2.3.

PERFIL DE CONO SOMERO (21 CORTADORES)



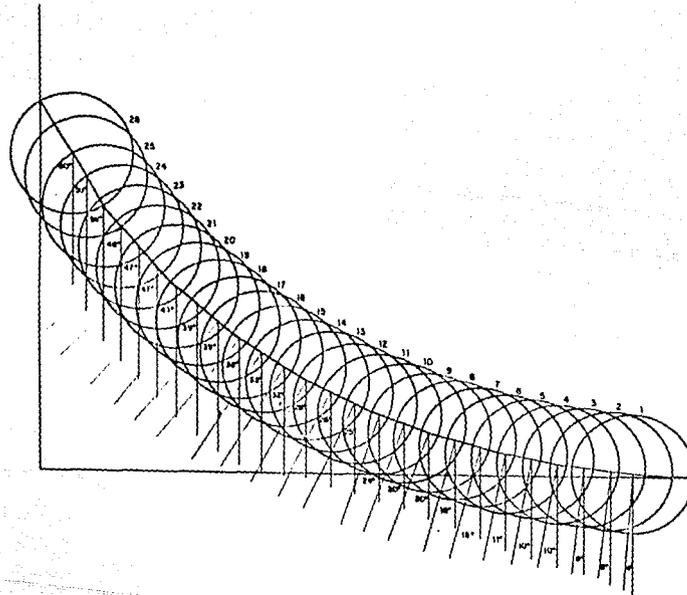
ESCALA 1:20

7.64 Cortadores/pg de red

Perfil 1.02 veces mayor al plano

FIGURA 2.1

PERFIL DE CONO MEDIO (26 CORTADORES)



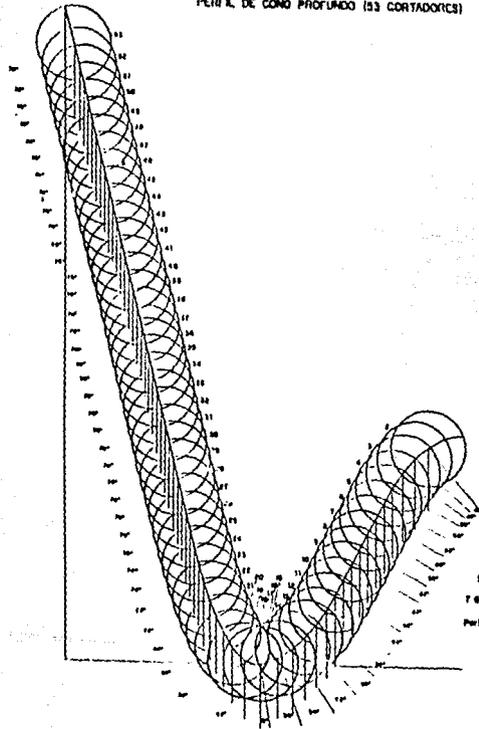
ESCALA 1 : 20

7.64 Cortadores/pg. de radio

Perfil 1.22 veces mayor al plano

FIGURA 2.2

PERFIL DE CONO PROFUNDO (53 CORTADORES)



ESCALA 1:20
7.64 Cortadores/pq. de radio
Perfil es visto desde el plano

FIGURA 2.3

SECCION 3. CALCULO DE LAS AREAS DE DESGASTE

Para una altura desgastada del cortador dada, se calcula inicialmente el valor longitudinal b , que se ilustra en la Figura 3.1, de la siguiente forma:

$$y = r - x \quad \text{ó} \quad y = r \cos(\lambda'/2)$$
$$b = (r^2 - y^2)^{\frac{1}{2}}$$

Luego, para un cortador con ángulo de ataque negativo ($\beta \neq 0$), se determina la distancia del semieje parabólico formado en la cara desgastada del modo siguiente (Figura 3.2).

$$\gamma = 90 - \beta$$
$$\tan \beta = L_1/x$$
$$\tan \gamma = L_2/x$$
$$L_1 = x \tan \beta$$
$$L_2 = x \tan (90 - \beta)$$
$$L = L_1 + L_2$$

Por lo que la sección de área desgastada será (Figura 3.3):

$$A_v = (\pi L b)/2$$

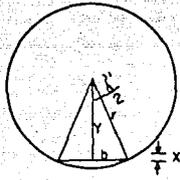


FIGURA 3.1

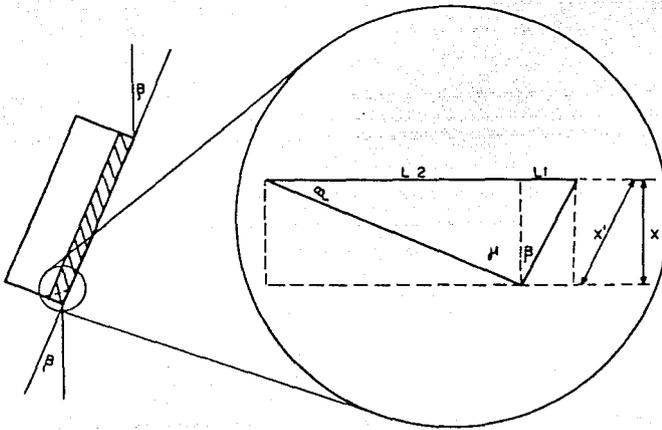


FIGURA 3.2

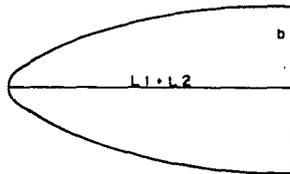


FIGURA 3.3

SECCION 4. CALCULO DEL VOLUMEN DE DESGASTE DEL CORTADOR

Auxiliandonos con la Figura 3.2, sabemos que:

$$L = x' / \text{sen} \beta$$

De la misma manera empleando la Figura 3.1, encontramos que:

$$r^2 = b^2 + (r - x')^2$$

$$b = (2rx' - x'^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{Geoméricamente } V_D = (\pi/2) L b = [(\pi x') / (2 \text{sen} \beta)] (2rx' - x'^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{Haciendo } B = \pi/2 \text{sen} \beta$$

$$\frac{dV_D}{dx} = B x' (2 r x' - x'^2)$$

$$\int dV_D = B \int x' (2 r x' - x'^2) dx$$

$$V_D = B \left\{ \left[- \frac{(2rx' - x'^2)^{\frac{3}{2}}}{3} \right] - \frac{r}{2} \left[(x'-r) (2rx' - x'^2)^{\frac{1}{2}} + r^2 \text{sen}^{-1} \frac{x'-r}{|r|} \right] \right. \\ \left. + \frac{\pi}{4} r^3 \right\}$$

El volumen de desgaste se puede determinar también, a partir de de la relación de volumen con el trabajo ejercido, así:

$$\frac{dV_D}{dt} \propto T$$

$$\frac{dV_D}{dt} = K T$$

$$K = \frac{1}{A} \text{ donde } A = \frac{\text{Trabajo}}{\text{Unidad de volumen}}$$

$$\frac{dV_D}{dt} = \frac{1}{A} (T_V + T_H)$$

$$T_V = F_V h$$

$$T_H = F_H \pi r$$

$$\frac{dV_D}{dt} = \frac{1}{A} (F_V h + F_H \pi r)$$

$$\mu = \frac{F_H}{F_V}$$

$$\frac{dV_D}{dt} = \frac{1}{A} (F_V h + \mu F_V \pi r) N$$

$$\int dV_D = \int \frac{F_V}{A} (h + \mu \pi r) N dt$$

$$V_D = \frac{N t}{A} (F_V h + F_H \pi r)$$

El valor de A se ha determinado experimentalmente en pruebas de laboratorio y reportando por Ziaja²² en su publicación.

$$A = \mu / Z_a$$

SECCION 5. CARACTERISTICAS DE ROCAS²⁷

Descripción	Porosidad (%)	c		θ
		MPa	psi	
Arenisca Berea	18.2	27.2	3944	27.8
Arenisca Bartlesville		8.0	1160	37.2
Arenisca Pottsville	14.0	14.9	2161	45.2
Arenisca Repetto	5.6	34.7	5032	32.1
Arcilla Muddy	4.7	38.4	5568	14.4
Arcilla Stockton		0.34	50	22.0
Arcilla Bentonitica	44	0.4	44	7.5
Marga Georgia	0.3	21.2	3074	25.3
Caliza Wolf Camp		23.6	3422	34.8
Caliza Indiana	19.4	6.72	975	42.0
Dolomia Hasmark	3.5	22.8	3306	35.5
Anhidrita Blaine		43.4	6293	29.4
Basalto Nevada	4.6	66.2	9600	31.0
Arcilla Green River ¹⁹			2500	20.0
Arenisca Oil Creek ¹⁹			3500	45.0

APENDICE B. MODELO DE FALCONER, BURGESS Y SHEPPARD

Este modelo muestra que el torque medido en el fondo (con MWD) se puede usar con el ritmo de penetración, separando los efectos de la barrena de los efectos litológicos cuando se perfora con barrenas PDC o tricónicas. Los resultados que encontraron fueron los siguientes:

1. Los cambios en el torque pueden usarse para clasificar la litología en tres categorías: porosa, arcillosa (lutita) y compacta, correspondiendo a torques alto, medio y bajo respectivamente.

2. La tendencia del torque y ritmo de penetración en formaciones tipo arcilloso, pueden usarse para determinar el desgaste de las barrenas PDC y tricónicas, por cambios en el esfuerzo de la arcilla.

3. No fue posible interpretar el desgaste de la barrena en formaciones sin arcilla.

4. La medición de los parámetros de perforación en la superficie generalmente es insensible a los cambios de formación (por ejemplo: fronteras de arena-arcilla), particularmente en agujeros desviados.

El primer método conocido que separa los efectos litológicos de los aspectos mecánicos de la perforación, es el exponente d , el cual fue usado por Jordan y Shirley, para calcular el parámetro de una variable dependiente (ritmo de penetración) en forma simple, como se ilustra en seguida:

$$d = \log (R/D) / \log (W/D) \quad (B.1)$$

El exponente d se usa en formaciones arcillosas, en zonas con tendencia a poca compactación, asociadas con cambios en presión de

poro.

Salto repentinos en la respuesta del exponente d , da cambios en el ritmo de penetración conjuntamente con cambios litológicos. Sin embargo con una sola variable dependiente no es posible separar la tendencia del ritmo de penetración asociado con el desgaste de la barrena y con la compactación de la roca o separar el embolamiento con los cambios de formación.

Una segunda variable dependiente es el torque, que mide el trabajo mecánico necesario para romper la roca. Es importante enfatizar que el torque medido en la superficie no es representativo del torque ejercido en el fondo, debido a la fricción ejercida por la sarta en las paredes del agujero, por lo que, es recomendable medir el torque en el fondo con el sistema MWD. El torque medido en el fondo se describe así:

$DTOR = \text{torque en la barrena} + \text{perdidas de torque por los estabilizadores colocados abajo del MWD.}$

El objetivo del modelo es describir una técnica simple para interpretar la respuesta de la perforación tanto con el ritmo de penetración como con el torque en el fondo del pozo, para un grupo de formaciones y un rango de pesos sobre barrena y velocidades de rotación dadas.

El modelo propuesto puede desarrollarse con dos técnicas, las cuales se describen como la "rápida" y la "completa", pero ambas basadas en los mismos criterios. La técnica rápida que se presenta a continuación, es sencilla y solo requiere de una calculadora manual, lo que hace que sea importante cuando se requiere tomar decisiones rápidas en el pozo. La técnica completa es más sofisticada y requiere de una computadora en el campamento, obteniendo mayor precisión a

mayor costo.

TECNICA RAPIDA. Se definen en esta técnica dos indicadores de diagnóstico simple que son:

$$\text{El torque adimensional: } T_D = M / (W * D) \quad (B.2)$$

$$\text{El esfuerzo aparente de la formación: } FORS = W * N / (R * D) \quad (B.2)$$

El torque adimensional T_D , se calcula en el campo reemplazando M y W con la medida respectiva del MWD de torque en el fondo (DTOR) y peso en el fondo (DWOB).

FORS se calcula en el campo determinando primero el ritmo de penetración adimensional R_D , obtenida de la medición en la superficie del ritmo de penetración y la velocidad de rotación, como se indica a continuación:

$$R_D = R / (N * D) \quad (B.3)$$

de este modo el cálculo de FORS será:

$$FORS = W / (R_D * D^2) \quad (B.4)$$

en esta ecuación se sustituye W por el peso en el fondo, DWOB.

El significado de FORS y T_D puede quedar establecido también por:

$$FORS = \sigma / (B * b_g * E_D) \quad (B.5)$$

$$T_D = b_g * (\tau / \sigma) * E_D \quad (B.6)$$

Estas ecuaciones son las que más se ajustan a barrenas PDC y molinos.

Se puede decir que FORS es proporcional al esfuerzo de penetración in-situ de la roca σ , e inversamente proporcional a la eficiencia E_p . La eficiencia de la barrena E_p , es un número adimensional que es igual a 1 cuando la barrena esta afilada (nueva) y se reduce a cero cuando los dientes o cortadores se desgastan por completo. b_g es una constante adimensional de la barrena que depende de la geometría de afilado del cortador.

T_D es proporcional a la eficiencia de la barrena E_p , con la relación del esfuerzo cortante in-situ τ y con el esfuerzo de penetración aparente σ . La relación del esfuerzo cortante se establece como:

$$\tau = 8 * T_D * FORS = 8 * N * M / (R * D) \quad (B.7)$$

El último término del segundo miembro de la ecuación es la energía usada por unidad de volumen de roca perforada.

A Efectos de la Litología. Las ecuaciones (B.5 y B.6) contienen términos litológicos, ya que FORS es directamente proporcional al esfuerzo de penetración el cual tiende a ser sensible a todos los cambios en las propiedades físicas de las rocas y la presión de confinamiento. Por su parte T_D es muy insensible en formaciones arcillosas dúctiles. Utilizando Gráficas cruzadas de DTOR vs. DWOB en estas formaciones, tiende a formarse una línea recta llamada línea base de lutitas y significa que la relación (τ/σ) permanece constante en formaciones arcillosas. A este valor constante se le denomina como $(\tau/\sigma)_{lutita}$. En areniscas y carbonatos la relación (τ/σ) no es constante.

Las ecuaciones (B.5 y B.6) tienen tres incógnitas E_p , τ y σ que generalmente no permiten obtener una única solución para E_p y σ (τ

puede calcularse con la ecuación (B.7). Sin embargo en formaciones arcillosas puede determinarse E_d ya que (τ/σ) permanece constante.

En la interpretación de la perforación, se introduce la definición de una constante a_1 , que se puede interpretar como datos equivalentes de T_D , para una barrena nueva perforando en arcilla. a_1 se establece con la siguiente relación:

$$a_1 = b_0 * (\tau/\sigma)_{lutita} \quad (B.8)$$

En un registro de T_D para una corrida de barrena, a_1 es justo el valor de la línea base de lutitas. Sustituyendo esta relación en las ecuaciones (B.5 y B.6), se tiene:

$$FORS = \tau * (\tau/\sigma)_{lutita} / (8 * a_1 * E_d) \quad (B.9)$$

$$T_D = a_1 * [(\tau/\sigma) / (\tau/\sigma)_{lutita}] * E_d \quad (B.10)$$

En formaciones arcillosas estas relaciones se transforman en:

$$FORS_{lutita} = \tau / (8 * a_1 * E_d) \quad (B.11)$$

$$T_{D_{lutita}} = a_1 * E_d \quad (B.12)$$

Para barrenas PDC el valor de a_1 de acuerdo a la experiencia cubre un rango de: $0.20 < a_1 < 0.35$.

Valores altos de T_D de la lutita ($> 1.1 * T_{D_{lutita}}$) normalmente indican formaciones porosas (como la arenisca) si coinciden con valores relativamente altos de FORS. Valores bajos de T_D de la lutita ($< 0.9 * T_{D_{lutita}}$) indican normalmente formaciones duras o compactas (como la dolomia) si coinciden con valores relativamente altos de FORS. Estos comportamientos se representan esquemáticamente

en una gráfica de T_b vs. FORS o de T_b vs. $1/\text{FORS}$ (Figura B.1).

Efectos de la Barrena. La eficiencia E_b se reduce significativamente cuando los cortadores o dientes se desgastan. Esta reducción da como resultado un incremento aparente en FORS (como resultado de la disminución del ritmo de penetración) y una disminución de T_b . El procedimiento de cálculo para determinar los efectos de la barrena, se describe a continuación:

1. Colocando el valor de T_b en la línea base de lutitas o cerca, se inicia a correr la barrena cuando la eficiencia se sabe que vale 1. Si éste valor es T_b de la lutita cero, entonces $a_1 = T_{b_{lutita0}}$. Entonces por cada metro perforado...

2. Calcular E_b aparente:

$$E_b \text{ aparente} = T_{b_{lutita}} / T_{b_{lutita0}}$$

En formaciones arcillosas (de la ecuación B.12):

$$E_b \text{ aparente} = E_b$$

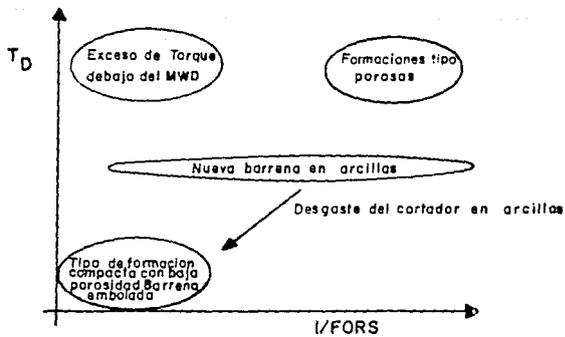
Para otras formaciones (de la ecuación B.10):

$$E_b \text{ aparente} = [(\tau/\sigma) / (\tau/\sigma)_{lutita}] * E_b$$

3. En formaciones arcillosas se tiene:

$$\text{FLAT (achataamiento)} = B * (1 - E_b)$$

4. El cálculo del esfuerzo aparente de la roca en todas las



GRAFICA DE T_D VS. $I/FORS$

FIGURA B.I

formaciones se estima como:

$$FORS = W * N/R * D$$

5. El esfuerzo aparente de la roca corregido por efectos de desgaste se obtiene con:

$$FORS \text{ corregido} = FORS * E_d$$

τ , se puede obtener con la ecuación (B.7) o calculando:

$$\tau = 8 * a_1 \text{ FORS corregido}$$

Estas ecuaciones lineales simples, son suficientes para hacer una interpretación rápida en la que puede determinarse el peso sobre barrena o el esfuerzo de la roca.

Ejemplo: La figura B.2 ilustra los datos de superficie del MWD de los últimos 152.4 m (500 pies) de una barrena PDC, que fue corrida en un pozo de la Costa del Golfo. El MWD se colocó arriba de los dos primeros estabilizadores. Los rayos gamma emitidos por el MWD mostraron con claridad las secciones de arenisca perforada, en tanto que la curva de ROP en los últimos 121.9 m (400 pies) es claramente insensible a cambios de formación.

La Figura B.2 es un registro de interpretación rápida. Se efectuaron dos cálculos de esfuerzo aparente de formación. En el carril 2 se tiene el esfuerzo de la formación calculado con el peso sobre barrena en el fondo, mientras que en el carril 3, se tiene el esfuerzo de la formación calculado con el peso sobre barrena medido en la superficie. El esfuerzo de la formación calculado con el peso en el fondo, muestra diferencias claras en las secciones de arena-lutita,

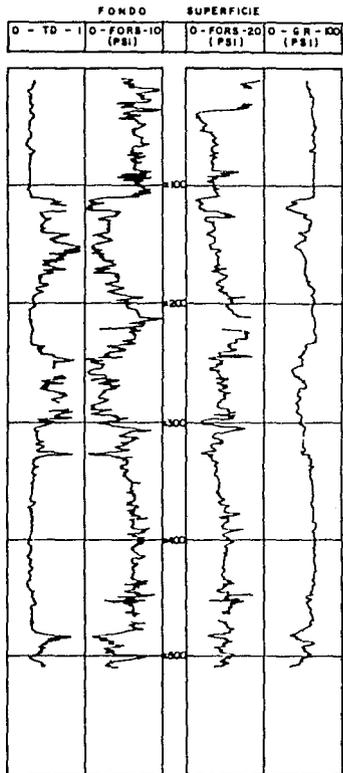
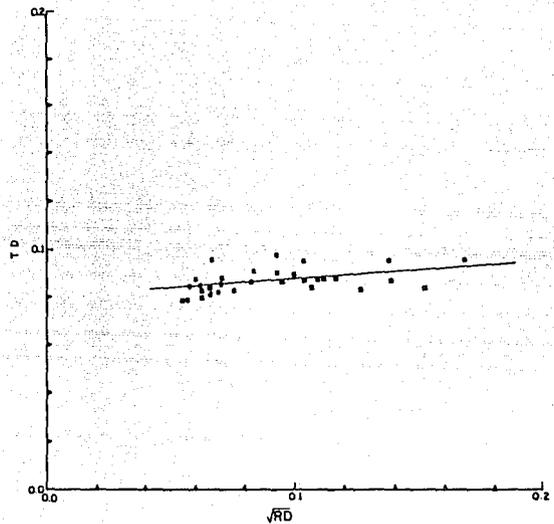


FIGURA B.2



GRAFICA DEL TORQUE ADIMENSIONAL VS LA RAIZ CUADRADA DEL RITMO DE PENETRACION ADIMENSIONAL PARA LOS PRIMEROS 35 PIES DE UNA BARRENA CON CORTADORES NUEVOS EN ARCILLA.

FIGURA B.4

mientras que el cálculo del esfuerzo superficial es relativamente insensible a cambios de formación.

T_D , es graficado en el carril 1. La línea base de lutitas con $T_D = 0.3$, indica que no cambian las condiciones de la barrena en este intervalo. En las secciones de arenisca T_D aumenta y muestra mayor definición que los rayos gamma emitidos por el MWD.

Interpretación Computarizada en Tiempo Real. Si se dispone de una computadora en el campamento junto con un sistema de información, es posible desarrollar una interpretación más detallada de la perforación en tiempo real.

Procedimiento:

1. Determinación de las constantes de la barrena: Únicamente se desarrolla cuando la barrena es nueva y afilada (cuando $E_D = 1$). Esto es equivalente a determinar la línea base de lutitas, graficando T_D vs. $R_D^{1/n}$ para arcillas de 8 a 15 m (25 a 50 pies) (ver Figura B.4). Se usó un valor de $n=2$ siguiendo la guía de Warren, pero para barrenas PDC el resultado no varía demasiado si usamos $n=1$. Los puntos en la gráfica definen una línea recta que describe la acción de perforación de una barrena nueva en formaciones arcillosas, por lo que:

$$T_D = a_1 + a_2 * R_D^{1/n} \quad (B.13)$$

a_1 , es la intersección de la línea recta con el eje T_D y toma los valores descritos en la técnica rápida. La pendiente a_2 se mide de la penetración de los cortadores (verticalmente). El segundo término de la ecuación puede interpretarse como una corrección aplicada a T_D . a_2 es cero para barrenas PDC ya que su acción de perforación es por cepillado.

Por cada metro (o pie) perforado se deben repetir los siguientes

pasos:

2. Calcular:

$$E_d \text{ aparente} = [T_D - 2 * a_2 * R_D^{1/n}] / [a_1 - a_2 * R_D^{1/n}]$$

en formaciones arcillosas:

$$E_d \text{ aparente} = E' d$$

en otras formaciones (de la ecuación B.10):

$$E_d \text{ aparente} = [(\tau/\sigma) / (\tau/\sigma)_{\text{lutita}}] * E' d$$

donde E_d' es la eficiencia no corregida.

3. Calcular el esfuerzo aparente de la roca para una formación:

$$FORS = W / (R_D * D^2)$$

4. Usando la tabla verdadera (Figura B.5), determinar si las formaciones perforadas son arcillosas o no.

5. Si deseamos corregir la eficiencia en formaciones arcillosas por efectos de fricción entre el diente desgastado y la roca, usamos la siguiente ecuación:

$$E_d = [E' d - \mu * \tan(\theta)] / [1 - \mu * \tan(\theta)]$$

6. Normalizar la eficiencia en formaciones arcillosas para cambios en el fondo de peso sobre barrena:

$$E_{Dn} = 1 - (1 - E_d) * (W/W_n)$$

7. Estimar el achatamiento de la barrena (únicamente en formaciones arcillosas) de la fórmula:

$$FLAT = 8 * (1 - E_{bn})$$

8. Corregir el esfuerzo aparente de la roca por efecto del desgaste de los dientes o cortadores de la barrena:

$$FORS \text{ corregido} = FORS * E_D$$

en teoría: $\tau = 8 * a_1 * FORS$

Si la tabla real indica un aumento real en el torque debajo del MWD que no se asocia con un cambio de formación entonces, el exceso de torque debajo del MWD no asociado con la acción normal de la barrena en la arcilla será calculado como:

$$\text{Exceso TOR} = (W * D) * [T_D - a_1 * E_{D_{lutta}} - a_2 * (2 - E_{D_{lutta}}) * R_D^{1/n}]$$

donde $E_{D_{lutta}}$ es la eficiencia aparente en formaciones arcillosas. El exceso de torque se puede usar para interpretar la localización de los estabilizadores colocados debajo del MWD.

9. Cambios en la relación τ/σ (determinado por la litología) causan la eficiencia aparente para salir de la tendencia normal en la arcilla. Para propósitos de correlación geológica se supone que E_D' no cambia en formaciones no arcillosas, por lo que FORM puede determinarse así:

$$FORM = (\tau/\sigma) / (\tau/\sigma)_{lutta}$$

$$\text{así que: } FORM = E_D \text{ aparente} / E_D'$$

Esta curva es 1 en la lutita. En formaciones porosas FORM es mayor que 1.0 y en formaciones compactas y poco porosas FORM es menor que 1.0. Esta característica trabaja bien excepto en arenas poco consolidadas donde la acción de perforación está dominada por la hidráulica. Estas formaciones están claramente identificadas por una tabla real. Figura B.5.

APENDICE C. MODELO DE KURU Y WOJTANOWSICZ.

En virtud de que las barrenas PDC son extremadamente sensitivas a las propiedades de la formación y a las condiciones de operación, se han llevado estudios encaminados a demostrar que tales barrenas tienen una fuerte correlación entre el torque y el desgaste de la barrena. Es decir, que el torque puede usarse como guía para seleccionar el peso sobre barrena y la velocidad de rotación para obtener la mayor penetración.

Los autores desarrollaron un modelo explícito para barrenas PDC, utilizando una expresión de torque. Las ecuaciones de torque y ritmo de penetración se combinan para dar un diagnóstico del modelo de perforación. El modelo se basa en un procedimiento simple que evalúa el desgaste instantáneo de los cortadores, por medio de una detección rápida de los cambios litológicos de las formaciones perforadas. Esta detección de datos de fondo es posible obtenerla instalando en el fondo un sistema de medición mientras se perfora (MWD).

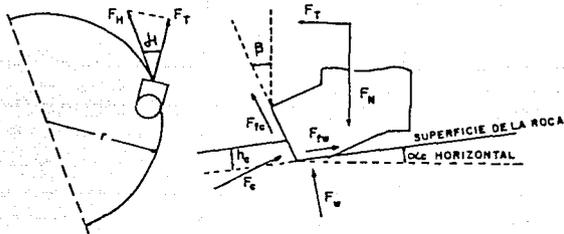
El modelo se deriva del análisis de fuerzas actuando en un solo cortador, como se ilustra en las Figuras C.1 y 2. Las ecuaciones de vida de la barrena, ritmo de penetración y torque, se deducen de un balance estático de fuerzas para un cortador moviéndose. Las suposiciones hechas para la derivación del modelo fueron las siguientes:

1. La formación tiene un comportamiento plástico, esto es, la roca se deforma sin perder su cohesión; en otras palabras la presión es proporcional al área de contacto y no depende de la penetración

TABLA I - TABLA VERDADERA

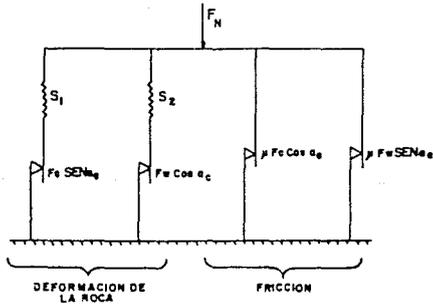
	ED APARENTE > LIMITE DE LA ARCILLA	ED APARENTE CON LIMITES DE ARCILLA	< ED APARENTE LIMITE DE ARCILLA
FORS > 0 = AL PROMEDIO DEL ESFUERZO DE LA ARCILLA	EXCESO DE TORQUE ABAJO DEL NWD FORM < 10	HACER CALCULO DEL DESGASTE DEL CORTADOR FORM = 10	FORMACION COMPACTA DE BAJA POROSIDAD FORM < 10
FORS < 0 = AL PROMEDIO DEL ESFUERZO DE LA ARCILLA	FORMACION POROSA FORM > 10		FORMACION POROSA FORM > 10

FIGURA B.5



DEFINICION DE LAS FUERZAS EN EL CORTADOR PDC

FIGURA C.1



BALANCE DE FUERZAS NORMALES - MODELO MECANICO

FIGURA C.2

(vertical) de los cortadores o su desplazamiento (horizontal).

2. El perfil del fondo del agujero es predominantemente paralelo al perfil de la barrena como resultado de la interacción de los cortadores.

3. Existe una similitud mecánica entre un solo cortador y la barrena entera, esto es:

a) El ritmo de penetración es proporcional a la penetración del cortador con una proporcionalidad constante k_s .

b) La fuerza normal actuando en un solo cortador es proporcional al peso sobre la barrena con una proporcionalidad constante k_s .

4. El ángulo de corte α se ignora, esto es, el cortador se mueve en dirección perpendicular a su eje.

5. El desgaste volumétrico de un cortador PDC, es proporcional al trabajo de fricción con una proporcionalidad constante k_z .

6. La inadecuada limpieza del fondo del agujero, da como resultado, una respuesta no lineal del ritmo de penetración con la velocidad de rotación.

7. Se ignoran los efectos de fricción en las superficies laterales del cortador.

El equilibrio de fuerzas para la geometría del cortador PDC típico (Figura C.1), define los componentes de las fuerzas normal y tangencial consideradas en el modelo. La fuerza normal es una fuerza distribuida a través de la superficie del cortador, su distribución se simplifica usando una mecánica similar a la ilustrada en la Figura C.2 El balance de todas las fuerzas interactuando entre la roca y el cortador se ilustra en la Figura C.3. Para pequeños valores de velocidad de corte α resulta despreciable. Sin embargo, las fuerzas de fricción inducidas, debidas a la presencia del ángulo de corte se

eliminan, como se ilustra en la Figura C.4.

La ecuación de balance de fuerzas horizontal y vertical se establece usando las Figuras C.1 y c.3, así:

$$F_N = F_c \operatorname{sen} \alpha + F_{fc} \cos \alpha + F_v \cos \alpha c + F_{fv} \operatorname{sen} \alpha c \quad (\text{C.1})$$

$$F_T = F_c \cos \alpha - F_{fc} \operatorname{sen} \alpha + F_{fv} \cos \alpha c - F_v \operatorname{sen} \alpha c \quad (\text{C.2})$$

donde: $F_c = R_c A_c$

$$F_v = R_p A_v$$

$$F_{fc} = \mu F_c = \mu R_c A_c \quad (\text{C.3})$$

$$F_{fv} = \mu R_p A_v$$

Para pequeños valores de profundidad del cortador ($h \leq 0.1$ pg.) el valor del ángulo de corte αc es muy pequeña. Ignorando αc e introduciendo (C.3) en (C.1) y (C.2) se obtiene:

$$F_N = R_c A_c [\operatorname{sen} \alpha + \mu \cos \alpha] + R_p A_v \quad (\text{C.4})$$

$$F_T = R_c A_c [\cos \alpha - \mu \operatorname{sen} \alpha] + \mu R_p A_v \quad (\text{C.5})$$

La fuerza horizontal del cortador F_H , se relaciona con la fuerza tangencial, como:

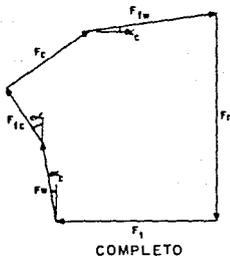
$$F_H = F_T \cos \beta^{-1} \cong F_T \quad (\text{C.6})$$

porque el ángulo de rascado β es menor a 5 grados.

El área de corte A_c , se puede calcular despejando de la ecuación (C.4), así:

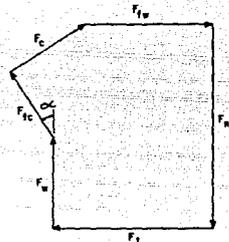
$$A_c = \frac{F_N}{R_c (\operatorname{sen} \alpha + \mu \cos \alpha)} - \frac{R_p A_v}{R_c (\operatorname{sen} \alpha + \mu \cos \alpha)} \quad (\text{C.7})$$

sustituyendo (C.6 y C.7) en (C.5) y empleando identidades



COMPLETO

BALANCE DE TODAS LAS FUERZAS DEL CORTADOR PDC.



SIMPLIFICADO

FIGURA C.3

FIGURA C.4

trigonómicas obtenemos:

$$F_N = F_N \frac{1 - \mu \tan \alpha}{\mu + \tan \alpha} - \frac{2 - (\mu + \tan \alpha)^2}{\mu + \tan \alpha} R_p A_v \quad (C.8)$$

Para convertir la ecuación (C.8) en la ecuación de torque de la barrena, la densidad de los cortadores se considera como una función del radio de la barrena $n(r)$, y el torque resulta como:

$$T_b = \frac{1 - \mu \tan \alpha}{\mu + \tan \alpha} \int_0^{r_b} F_N n(r) r dr - \frac{2 - (\mu + \tan \alpha)^2}{\mu + \tan \alpha} R_p \int_0^{r_b} A_w n(r) r dr \quad (C.9)$$

Para hacer explícita la ecuación (C.9) se requiere conocer la distribución de cargas y el desgaste a través de la cara de la barrena. De este modo se supone que la carga se distribuye a lo largo del radio y que el trabajo desarrollado por los cortadores es diferente para cada radio (diseño desbalanceado de la barrena), representandose con la función $f_1(r)$:

$$W(r) = 2W/db = \text{constante} \quad ; \quad A_v(r) = A_v f_1(r) \quad (C.10)$$

Sustituyendo (C.10) en (C.9) e integrando el torque de la barrena se tiene:

$$T_b = W \frac{4(1 - \mu \tan \alpha)}{db(\mu + \tan \alpha)} - A_v \frac{2 - (\mu + \tan \alpha)^2}{\mu + \tan \alpha} C_1 R_p \quad (C.11)$$

$$\text{donde: } C_1 = \int_0^{r_b} f_1(r) n(r) r dr \quad (C.12)$$

En condiciones reales de perforación la correlación entre el ritmo de penetración y el torque es mucho más fuerte que la correlación entre cada uno de ellos con el peso sobre barrena. Este fenómeno se documenta con estudios^{15,34} recientes.

En opinión de los autores, para propósitos prácticos, la poca sensibilidad del torque con el peso sobre barrena puede compensarse introduciendo el ritmo de penetración en la ecuación (C.11). El objeto es mejorar la determinación de la variable no medida (desgaste de la barrena), usando las otras cuatro variables medidas (W, N, T_b, R).

El área de desgaste A_v en la ecuación (C.11) se puede escribir en función del ritmo de penetración, velocidad de rotación, desgaste y peso sobre barrena, usando las ecuaciones de ritmo de penetración, expresadas por las siguientes ecuaciones:

$$R = K G_1 [W - W_0] U_b N^2 \quad (C.13)$$

$$\text{donde: } W_0 = G_2 A * A_v d_n * k_1 * R_p$$

$$A = (\pi d_c^2) / 4$$

$$A_v d = A_v / A$$

$$A_v d_n = A_v d / 3.8463703$$

$$A_v = [W - \frac{R}{K G_1 U_b N^2}] / (R_p k_1)$$

Introduciendo la ecuación (C.13) en la (C.11), dividiendo ambos lados por (W/db) y estandarizando, se obtiene:

$$T_b = E_1 + E_2 F_D \quad (C.14)$$

donde:

$$E_1 = \frac{48 k_1 (1 - \mu \tan \alpha) - C_1 db [2 - (\mu + \tan \alpha)^2]}{db^2 k_1 (\mu + \tan \alpha)} \quad (C.15)$$

$$E_2 = \frac{12 C_1 [2 - (\mu + \tan \alpha)^2]}{db^2 k_1 K G_1 (\mu + \tan \alpha)} \frac{R_{at}}{(W/db)_{st} N_{st}^a}$$

$$T_D = \frac{12 T_b}{W db} \quad (C.16)$$

$$F_D = \left(12 \frac{R}{R_{at}} \right) / [U_D (W/W_{st}) (N/N_{st})^2] \quad (C.17)$$

Método de interpretación de datos del MWD. El método se basa en el modelo de diagnóstico de perforación (ecuación C.14). En esta ecuación los grupos adimensionales T_D y F_D , son funciones de las variables de perforación medidas (peso sobre barrena, velocidad de rotación, ritmo de penetración y torque) y una no medida -desgaste de la barrena- (función de U_D). Al mismo tiempo las propiedades mecánicas de la roca perforada y la geometría de la barrena PDC están contenidas en las constantes E_1 y E_2 .

El procedimiento de interpretación es el siguiente:

1. Calcular las variables adimensionales T_D y F_D usando la ecuación (C.16). El desgaste de la barrena, función de U_D , es igual a la unidad para barrenas nuevas. De aquí que F_D y T_D se estimen usando los datos de los periodos iniciales de perforación.

2. Hacer una gráfica de T_D vs. F_D . Verificar la linealidad de la gráfica y dibujar una línea recta. La posición y dirección de esta línea (E_1 , E_2) representa la formación perforada.

3. Usar un record continuo del MWD para detectar cualquier cambio en la tendencia de la línea recta. Un cambio en la dirección indica un cambio de formación.

4. Usar los datos de la línea recta para detectar valores instantáneos de desgaste en la barrena, tales como:

a) Calcular el valor de T_b con la ecuación (C.16)

b) Calcular T_b con la ecuación (C.14) o con la gráfica de T_b vs. F_b y determinar el valor de F_b correspondiente.

c) Calcular U_b con la ecuación (C.17)

d) Determinar el desgaste

Si no se cuenta con el sistema MWD, este método solo proporciona el valor instantáneo de los parámetros de perforación para prevenir una fatiga prematura de la barrena.

APENDICE D. MODELO DE WARREN Y SINOR.

El modelo descrito por los autores fue desarrollado para ayudar a seleccionar y evaluar las barrenas PDC. También sirve como base para identificar y cuantificar algunos factores adicionales que afectan el desarrollo de la barrena, comparando el modelo de predicción con datos de laboratorio o de campo.

Es muy importante que las fuerzas que actúan en una barrena de fricción deban estar balanceadas. Si las fuerzas actuando en la barrena están desbalanceadas, provocarán que la barrena tienda a girar fuera del centro, dando como resultado un acelerado desgaste y una reducción en el ritmo de penetración.

El modelo propuesto se basa en varias suposiciones que simplifican su desarrollo, las cuales son:

-La barrena y cortadores se consideran como un cuerpo rígido y el peso sobre la barrena se supone estático. La carga estática en la barrena es una buena suposición cuando la barrena tiene las fuerzas de los cortadores balanceadas; pero si la barrena está desbalanceada la carga no es estática.

-Se considera que los cortadores hacen un corte liso (cepillado). Esta consideración es mayor en rocas dúctiles que en frágiles.

-Se supone que las rocas afalladas no contribuyen con las fuerzas de corte (esto no es válido para rocas, diseños de barrenas y condiciones hidráulicas donde ocurra embolamiento).

-Se supone que la barrena gira alrededor de su línea central.

Existen varias referencias en la literatura que discuten el comportamiento de las fuerzas actuando en los cortadores. Por ejemplo, Cheatham muestra que las fuerzas del cortador son función del área de corte y el esfuerzo cortante de la roca; sus pruebas indican que las fuerzas del cortador son independientes de la forma del cortador. Gray, menciona en su publicación que el incremento de la fuerza requerida para penetrar la roca disminuye con la profundidad de corte. Esta información junto con otras publicaciones condujo a determinar que la fuerza normal es una función del ángulo de ataque y la fuerza de corte es independiente de la cara de ataque del cortador. El efecto de la variación de la profundidad de corte con la fuerza de penetración esta dado por la función de profundidad efectiva de corte ilustrada en la Figura D.1, donde:

$$F_N = \frac{\cos(\alpha - BR)}{1 - \sin(\alpha - BR)} dv Br RS dca C_1 + Av RS Cz \quad (D.1)$$

Por otro lado la fuerza circunferencial del cortador depende de la fricción entre la roca y el cortador y la fuerza requerida para fracturar la roca. Esto es:

$$F_x = \frac{\sin(\alpha - BR)}{1 - \sin(\alpha - BR)} C_2 RS dv dcm + C_4 F_N \quad (D.2)$$

El primer término de esta ecuación es la fuerza de corte y el segundo término es la fricción ejercida por el desgaste del cortador.

La componente vertical de la fuerza de penetración esta dada por:

$$F_v = F_N \cos(\beta) \quad (D.3)$$

El peso sobre barrena es la suma de las componentes verticales de la fuerza de penetración (en barrenas planas). En barrenas cónicas el peso sobre barrena es menor que la fuerza de penetración. Esto da como resultado que las barrenas cónicas requieran menor peso que las barrenas planas para perforar a un mismo ritmo de penetración.

Glowka, menciona en sus publicaciones que el mecanismo de desgaste de las barrenas PDC depende de la temperatura de los cortadores. Su modelo empírico se incorpora en esta discusión y se estima con la siguiente relación:

$$TW = T_f + \frac{K_f F_N V_F}{AW} \left[1 + \frac{3(\pi)^{1/2}}{4} f K_{hf} \left(\frac{V}{\alpha L} \right)^{-1} \right] \quad (D.4)$$

El ritmo de desgaste se basa en la relación empírica entre el ritmo de desgaste en una arenisca tipo y la temperatura del cortador.

Para correr el modelo de una barrena PDC, es necesaria una descripción detallada de la geometría de la barrena. Esta descripción se obtiene por medio de una máquina que mide los tres ejes coordenados.

Cada cortador en las barrenas PDC se mueve en espiral en un radio igual a la distancia de la línea central de la barrena al cortador y es igual a la distancia dada por la penetración en cada revolución, así:

$$d = rop / rpm * (\theta_i - \theta_{i+1}) \quad (D.5)$$

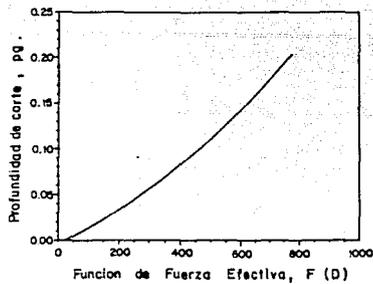


FIGURA D.1