

Análisis estático del modelo de una broca de perforación tipo PDC mediante el método de elementos finitos

págs. 179-192

Grupo de investigación: Nuevas tecnologías de perforación

Línea de investigación: Brocas

José Alejandro Guerrero• Juan S. Rodríguez•• José Vicente Torres••• Lilia Polanco••••

Recibido: 3 de mayo de 2013 Aceptado: 16 de octubre de 2013

RESUMEN

Se desarrolló una simulación computacional mediante el método de elementos finitos del comportamiento mecánico del modelo de una broca de perforación tipo PDC en estado estacionario, tomando un instante de tiempo del movimiento rotacional. Con el propósito de simplificar el análisis y facilitar el cálculo computacional de los estados de esfuerzo y deformación presentes tanto en el cuerpo como en los cortadores de la broca, se consideró solo las fuerzas mecánicas generadas por la interacción cortador-roca, descartando cargas térmicas, de vibración, y de impacto, así como el desgaste de los cortadores generado por la fricción. Con los resultados obtenidos mediante el software de elementos finitos se estableció la condición más crítica de operación de la broca bajo las condiciones y simplificaciones mencionadas.

Palabras clave: Equilibrio estático, Broca PDC, modelo, Simulación computacional.

ABSTRACT

There developed a computer simulation using the finite element method model of the mechanical behavior of a PDC drill bit steady state rate, taking a time instant of the rotational movement. In order to simplify and facilitate the analysis of computational stress and deformation states present in both the body and the drill cutters are considered only mechanical forces generated by the cutter-rock interaction, discarding thermal loads, vibration and impact, as well as wear of the friction generated by the cutters. With the results obtained by the finite element software is the most critical set of the bit operation under the conditions and simplifications mentioned.

Keywords: Static balance, PDC Drill, model, computer simulation.

• Ingeniero Mecánico. Director del grupo de investigación en Diseño Avanzado. Universidad de América.

•• Estudiante Coinvestigador. Programa de Ingeniería Mecánica Universidad de América.

••• Ingeniero Departamento de Perforación de Ecopetrol.

•••• Ingeniera Departamento de Perforación Ecopetrol. Proyecto desarrollado en convenio con Ecopetrol - ICP.

1. INTRODUCCIÓN

En la producción petrolera, la actividad de perforación es necesaria e imprescindible para extraer el crudo de un yacimiento. Teniendo en cuenta que los requerimientos operacionales de esta actividad generan altos costos asociados, siendo uno de estos el relacionado con las brocas, se hace necesario encontrar técnicas de análisis que permitan la optimización de las condiciones de operación, mediante la predicción del comportamiento mecánico según las cargas que se aplican y generan durante su desempeño. Si se cuenta con un método para predecir comportamientos mecánicos y generar mejoras en la selección, esto conllevaría a un aumento en la eficiencia del desempeño de la broca, disminuyendo tiempos de perforación, costos adicionales causados por los viajes requeridos para reemplazos y permitiría un mejor entendimiento de las condiciones físico-mecánicas a las que se encuentra sometida una broca por las fuerzas presentes durante su trabajo. Estas fuerzas generan los correspondientes esfuerzos y deformaciones que son responsables de causar fallas mecánicas si se exceden ciertos valores límites asociados con las propiedades de los materiales con que se fabrican, por tanto es necesario determinar y controlar los esfuerzos y deformaciones para prolongar su vida útil.

El análisis se lleva a cabo en tres etapas. En la primera se examinan los criterios y parámetros requeridos para el diseño de una broca PDC, y se establecen las fuerzas mecánicas que se generan en la interacción cortador-roca en el momento de la perforación, implementando un modelo matemático para su respectivo cálculo. La segunda consiste en realizar un modelo geométrico 3D de una broca PDC mediante el software CAD Solid Edge ST, con este se diseña el perfil de corte, la disposición, arreglo geométrico y tamaño de los cortadores, la disposición y número de aletas, la dimensión del calibre, las dimensiones del cuerpo y finalmente la geometría del vástago; en la última etapa se realiza la simulación de las condiciones mecánicas presentes en la broca durante la acción

de perforación, para eso las fuerzas calculadas se integran en el análisis por elementos finitos el cual entrega como resultado los respectivos valores de esfuerzo y deformación. Finalmente se evalúan los resultados obtenidos para determinar la situación más crítica de operación de acuerdo con los parámetros de diseño establecidos. Esta última etapa se repite para tres diferentes tamaños de cortadores con el propósito de comparar su influencia en el comportamiento mecánico de la broca.

2. METODOLOGÍA

El análisis se lleva a cabo en tres etapas. En la primera se examinan los criterios y parámetros requeridos para el diseño de una broca PDC, y se establecen las fuerzas mecánicas que se generan en la interacción cortador-roca en el momento de la perforación, implementando un modelo matemático para su respectivo cálculo. La segunda consiste en realizar un modelo geométrico 3D de una broca PDC mediante el software CAD Solid Edge ST, con este se diseña el perfil de corte, la disposición, arreglo geométrico y tamaño de los cortadores, la disposición y número de aletas, la dimensión del calibre, las dimensiones del cuerpo y finalmente la geometría del vástago; en la última etapa se realiza la simulación de las condiciones mecánicas presentes en la broca durante la acción de perforación, para eso las fuerzas calculadas se integran en el análisis por elementos finitos el cual entrega como resultado los respectivos valores de esfuerzo y deformación. Finalmente se evalúan los resultados obtenidos para determinar la situación más crítica de operación de acuerdo con los parámetros de diseño establecidos. Esta última etapa se repite para tres diferentes tamaños de cortadores con el propósito de comparar su influencia en el comportamiento mecánico de la broca.

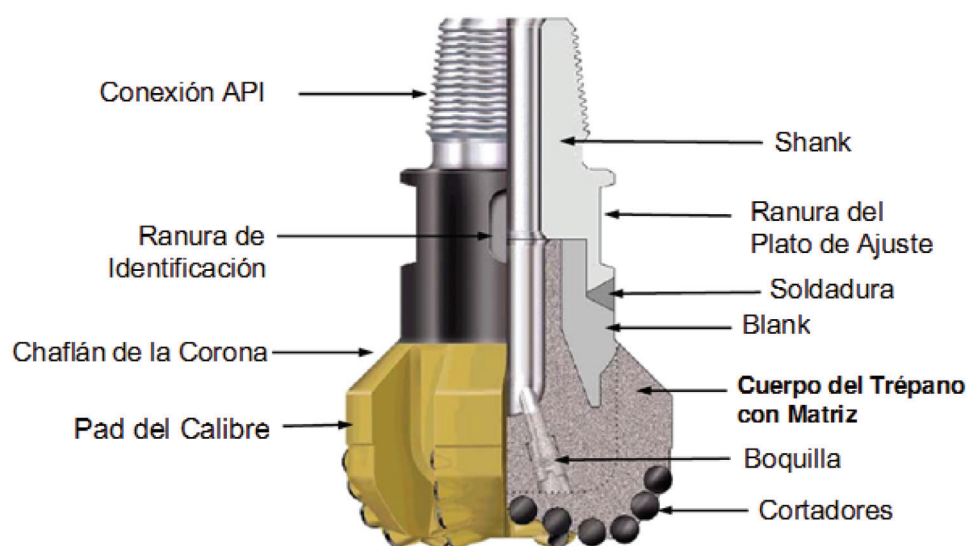
2.1. Estructura de una broca PDC

Una broca PDC se puede estructurar en tres grandes componentes: La estructura de corte (cor-

tadores), el cuerpo, y el Shank (vástago), cada una cumple con una función específica y cuenta con unas características apropiadas para su óptimo desempeño. Todas las brocas PDC cuentan esencialmente con los mismos componentes pero distintos elementos de corte y sistemas hidráulicos. **Estructura de corte.** La estructura de corte de una broca PDC está constituida por cortadores de diamante sintético policristalino compacto. El tipo de elemento de corte depende de la formación en la que se trabajará. **Cuerpo.** Es la parte más maciza con la que cuenta la broca, en este tipo de brocas el cuerpo suele estar hecho

de acero aleado o de matriz de carburo de tungsteno que es una matriz hecha a partir de carburo de tungsteno en polvo (sinterizado), con una aleación de níquel-cobre que actúa como aglutinante. **Shank.** Es el vástago, posee la conexión de rosca API del pin que vincula la broca con la sarta de perforación como así también el plato de ajuste y las ranuras de identificación. (Smith Bits, 1989 referenciar) Existen otras partes y componentes que son de vital importancia en la broca como lo son las aletas (Blades), las boquillas (Nozzles), el bisel del cuerpo (Crown Chamfer), que se observan en la figura 2.

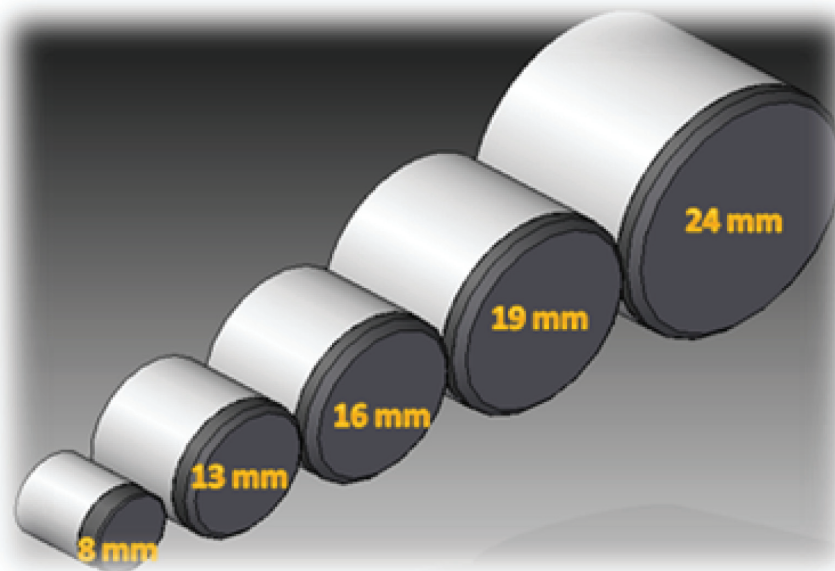
Figura 1. Partes de una broca PDC.



2.2 criterios de diseño

Las brocas PDC pertenecen al tipo de brocas que utilizan cortadores fijos de Diamante Policristalino Compacto y este se caracteriza por ser sintético. El diseño básico de los cortadores es en forma de pastilla, montada sobre un substrato cilíndrico de carburo de tungsteno, el cual se fija a las aletas que conforman el cuerpo de la broca. El mecanismo de corte de las brocas PDC es por arrastre y desprendimiento de material de la roca. En un artículo de 2001, *Data log* menciona que las brocas tipo PDC por su diseño hidráulico y el de sus cortadores en forma de pastillas tipo

moneda, y además por sus buenos resultados en la perforación rotatoria de diferentes tipos de litología, este tipo de brocas es la más usada en la actualidad para la perforación de pozos petroleros. En las brocas PDC como se mencionó, las pastillas de diamante policristalino compacto son montados en una matriz de carburo de tungsteno o acero aleado como se observa en la figura 1, en donde el sustrato está en color gris claro y la pastilla es la de color oscuro. Los diamantes realizan el corte, mientras el carburo de tungsteno los sostiene proveyéndoles de resistencia y amortiguación frente a las constantes cargas de impacto en la interacción cortador-roca.

Figura 2. Cortador con sustrato y pastilla

Perfil

Este hace referencia a la forma que describe la broca desde una vista lateral. Es un componente de diseño vital para el óptimo desempeño, el perfil permite un desgaste continuo de la estructura de corte y proporciona mayor estabilidad. Este componente tiene como princi-

pal función dar espacio para la ubicación de los cortadores y mantener la estabilidad de la broca, la figura 3 muestra el croquis del perfil con sus dimensiones características, y en la figura 4 se observan las partes que componen el perfil; cono, nariz y hombro. La forma del perfil determinará la densidad de cortadores que tendrá la broca.

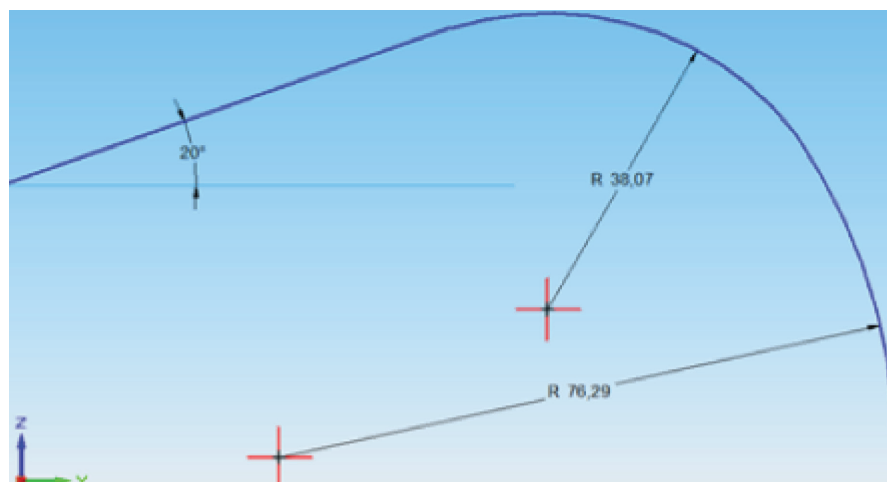
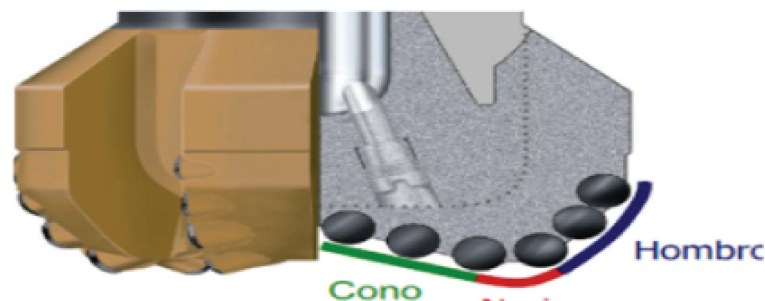
Figura 3. Croquis de perfil.

Figura 4. Partes del perfil.

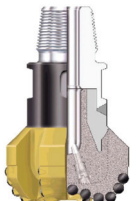


Fuente. Alian Besson. Schlumberger. Propiedades de los cortadores.

Calibre

El calibre es un parámetro importante en el diseño de una broca, debido a que este determinará características como la direccionalidad, la estabilidad y el tamaño de la misma. La tabla 1 muestra los tamaños estándar de calibres para brocas PDC.

Tabla 1. Tamaño estándar de calibres para broca PDC.

Tamaño estándar de calibres para broca PDC		
	Tamaño de Brocas	Calibre Estándar (pul)
		≤ 5
	5,001-9,000	2,5
	9,001-13,000	3
	13,001-18,000	3,5

2.3 Estado de cargas y modelo matemático

Las fuerzas que se generan en la broca durante el proceso de perforación se originan por la interacción del cortador con la roca. Las principales fuerzas se muestran en la figura 5.

Modelo matemático

Los primeros modelos matemáticos que describen el estado de cargas en una broca PDC surgen en 1980, proporcionando un primer acercamiento a las condiciones reales. Con el

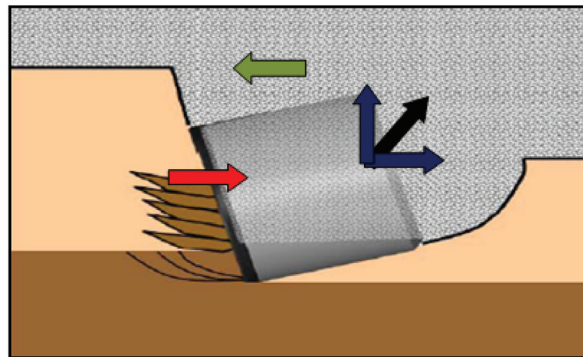
trascurso del tiempo y el desarrollo de nuevos métodos experimentales, los modelos han avanzado bastante permitiendo incluir una gran cantidad de variables necesarias, como ángulo de cortadores, geometría propia de la broca, presión de lodo y datos geotécnicos. Para el análisis de cargas, en este proyecto se empleó un nuevo modelo matemático propuesto en el año 2006 por Gerbaud y Menand. En el modelo, la fuerza total que actúa sobre el cortador PDC se divide en tres fuerzas: la primera que actúa sobre la superficie del cortador (F^C), la segunda que actúa sobre el bisel (F^{CH}), y la tercera actúa en la parte de atrás del cortador (F^B), como se observa en la figura 6. El modelo matemático es expresado por medio de la ecuación 1.

Ecuación 1. Modelo matemático fuerzas





$$F = F^C + F^{CH} + F^B$$

El modelo considera una serie de ecuaciones que permiten integrar las características técnicas del cortador y las propiedades de la roca, por lo cual es más complejo pero muestra un avance significativo en relación con los resultados encontrados de manera experimental. El modelo contempla: la formación rocosa y sus principales características, el coeficiente y ángulo de fricción entre la cara del cortador y la roca, el ángulo de falla de la roca (Clivaje), la presión de lodo, entre otros, para así desarrollar un análisis más completo y obtener un resultado más cercano a lo que se produce en una perforación real.

Figura 5. Fuerzas interacción cortador-roca



Fuente. J.J Azar. Drilling Engineering. Modificado por el autor.

-  = Fuerza ejercida por la Broca.
-  = Fuerza ejercida por la roca.
-  = Reacciones en el cortador debido al ángulo del mismo (*Back Rake*).
-  = Resultante de fuerza, debido a la interacción Cortador-roca.

Las ecuaciones para la cara del cortador quedan de la siguiente forma:

Ecuación 2. Fuerza en la cara del cortador avanzado.

$$F_C^C = \sigma_o * (1 + K * \tan(\varphi'') + \tan(W_c)) * A$$

$$F_n^C = \sigma_o * (\tan(\theta_f) + K * \tan(W_c)) * A$$

Donde:

- F_C^C : Fuerza de corte en el cortador. (N)
- F_n^C : Fuerza en normal en el cortador. (N)
- K: Coeficiente de fricción entre el cortador-roca.
- φ'' : Ángulo de fricción entre la roca triturada y la roca virgen.
- σ_o : Esfuerzo hidrostático presente en el cortador.

Fuerza en el bisel (*Chamfer*)

El bisel tiene como ventaja distribuir mejor las fuerzas presentes en la perforación, además de evitar que los cortadores salten o presenten vibraciones excesivas en formaciones duras, los cortadores en la actualidad se fabrican con el bisel a pesar de eso no se evaluaba su interacción y las diferencias que esto producía, por esta razón se elaboró unas ecuaciones para conocer la diferencia que el bisel representaba a la hora de perforar, con lo cual se logró un mejoramiento.

Ecuación 3. Fuerza en el bisel.

$$F_C^{CH} = \sigma_o * \tan(\varphi'') * A_{CH}$$

$$F_n^{CH} = \sigma_o * A_{CH}$$

Donde:

- F_C^{CH} : Fuerza de corte en el bisel. (N)
- F_n^{CH} : Fuerza normal en el bisel. (N)
- σ_o : Esfuerzo hidrostático presente en el cortador.

A_{CH} : Área del bisel.

φ " : Ángulo de fricción entre la roca triturada y la roca virgen.

Fuerza en la parte posterior del cortador

Además de la fuerza en la cara del cortador y las fuerza en el bisel, adicionalmente se complementa el modelo con una tercera fuerza que se presenta en la parte posterior del cortador esta se presenta debido a que el material removido es enviado a la parte posterior del cortador.

Ecuación 4. Fuerza en la parte posterior del cortador.

$$F_C^B = \sigma_o * f(\alpha, d, wd)$$

$$F_n^B = F_C^B * f(\alpha, d, wd)$$

Presión de lodo

Continuando con la previa identificación de cada una de las variables relacionadas en la formula dada por el nuevo modelo de interacción de cortador-roca, es necesario determinar la presión de lodo, para lo cual a continuación se hace una descripción del modelo empleado para su cálculo.

Evaluación del efecto de la presión de lodo

La presión de lodo varía según la litología a perforar, fluido utilizado y las características de este, debido a que la presión se modifica a medida que se perfora es importante valuar el efecto que tiene en las fuerzas que se presentan en el cortador y en la broca. La presión de lodo es un elemento significativo en la perforación ya que es el método por el cual se elimina los residuos generados por el proceso, y algunas veces incluso se perfora únicamente con la presión del fluido, esta puede fluctuar entre 800 psi a 2200 psi, teniendo en cuenta que con presiones tan

elevadas se puede erosionar la broca con el mismo efecto del fluido.

Con los datos de presión de lodo se pueden obtener los valores de σ_o , F_c y F_n los cuales están relacionados con K y el ángulo de Back rake. Se observa que por cada 100 psi que se incrementa la presión de lodo se obtiene un rango de aumento desde 9,85 N hasta 21,22 N para la fuerza de corte, mientras que para la fuerza normal por cada 100 psi que se incrementa la presión se alcanza un rango de aumento de 22,85 N hasta 25,05 N según la tabla 2.

Modelo matemático para el conjunto de cortadores en la broca

El modelado computacional en las operaciones de perforación se realiza para mejorar la eficiencia, aumentar el rendimiento y proteger los componentes costosos de fondo de pozo, además de evaluar previamente el desempeño de la broca, evitando una incorrecta selección y optimizando rangos de operación de la misma. Las fuerzas y momentos que actúan sobre una broca PDC se obtienen a través del modelo previamente estudiado en este capítulo, el cual permite obtener las sumas vectoriales de cada cortador, las cuales al ser integradas forman un único cuerpo compuesto de todas estas sumas vectoriales. Los modelos son desarrollados para analizar el comportamiento de los componentes ya sea en forma individual, tal como la broca o el BHA, o pueden abordar todo el sistema en conjunto. El desarrollo de un modelo estático para una broca PDC puede comprender diferentes ítems a evaluar como los son: la interacción cortador-roca, el efecto del torque, el WOB, y el comportamiento en diferentes litologías, lo que genera es un sin fin de variables a analizar por eso se hace necesario separarlas e indagar en cada una de las variables para tener como resultado una unificación de estas. La resultante de la sumatoria de las fuerzas normales que aparecen en la broca, en un determinado instante de tiempo son iguales al peso en la broca (WOB) en ese mismo instante de tiempo para poder penetrar la formación y así tener una interacción cortador-roca, además este

definirá cuanto se espera que entre el conjunto de cortadores dando como resultado una tasa de penetración (ROP) mas alta o mas baja.

Ecuacion 6. Fuerza vertical-WOB

$$\sum_{i=1}^n \text{Fuerza Normal de los cortadores} = \text{WOB}$$

Otro factor determinante es el torque que se evalúa por medio de la sumatoria de fuerzas de corte. El torque en la broca (TOB) para poder retirar la formacion es igual a la sumatoria de las fuerzas de corte que son multiplicadas por el radio de cada cortador en un determinado instante de tiempo. Como resultado se obtendra que cada cortador generara un torque diferente debido a su ubicación en el perfil característico de la broca.

Ecuacion 7. Fuerza de corte-Torque

$$\sum_{i=1}^n (\text{Fuerza de corte}) = \text{Torque}$$

2.4 Digitalización en 3d de la geometría de una broca PDC

El radio de la nariz es de 38,07 mm con una distancia angular de 72° grados, donde se encontraran la mayoría de los cortadores, el hombro tiene un radio de 76,29 mm con una distancia angular de 33° grados y contendrá 6 cortadores de 13 mm. Una vez realizado el perfil se dispone a ubicar los cortadores y distribuirlos de manera que se cumplan con lo establecido en la fase de diseño, ubicando cada una de las aletas con las que contara la broca que serán distribuidas de manera asimétrica para tener un menor efecto en el pozo, la distribución de las alteas principales se estableció de la siguiente manera: la primera aleta a cero grados, la segunda aleta a 105° grados y la tercera aleta a 248°grados, las aletas secundarias se ubicaron de manera opuesta a las aletas principales. En la tabla 3 se observan los tamaños de los cortadores en las zonas características de la broca, para los diferentes modelos de esta.

Tabla 2. Evaluación de la presión de lodo y su relación con los parámetros del modelo matemático.

Presión de Lodo (psi)	Presión de Lodo (Mpa)	so	K	Back Rake	Fc	Fn	D Fc	D Fn
800,00	5,52	17,04	0,27	15,00	190,75	437,34	9,85	22,59
900,00	6,21	17,92	0,27	15,00	200,60	459,93	9,85	22,59
1000,00	6,89	18,80	0,27	15,00	210,46	482,52	9,85	22,59
1100,00	7,58	19,68	0,27	15,00	220,31	505,11	9,85	22,59
1200,00	8,27	20,56	0,27	15,00	230,16	527,70	9,85	22,59
1300,00	8,96	21,44	0,27	15,00	240,02	550,29	9,85	22,59
1400,00	9,65	22,32	0,27	15,00	249,87	572,88	9,85	22,59
1500,00	10,34	23,20	0,27	15,00	259,72	595,46	9,85	22,59
1600,00	11,03	24,08	0,27	15,00	269,57	618,05	9,85	22,59
1700,00	11,72	24,96	0,27	15,00	279,43	640,64	9,85	22,59
1800,00	12,41	25,84	0,27	15,00	289,28	663,23	9,85	22,59
1900,99	13,10	26,72	0,27	15,00	299,13	685,82	9,85	22,59
2000,00	13,79	27,60	0,27	15,00	308,98	708,41	9,85	22,59
2100,00	14,48	28,49	0,27	15,00	318,84	731,00	9,85	22,59
2200,00	15,17	29,37	0,27	15,00	328,69	753,59	9,85	22,59

Tabla 3. Características de los diferentes modelos de la broca.

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
CONO	13	16	19
NARIZ	19	19	19
HOMBRO	19	19	19
GAGE	13	13	13

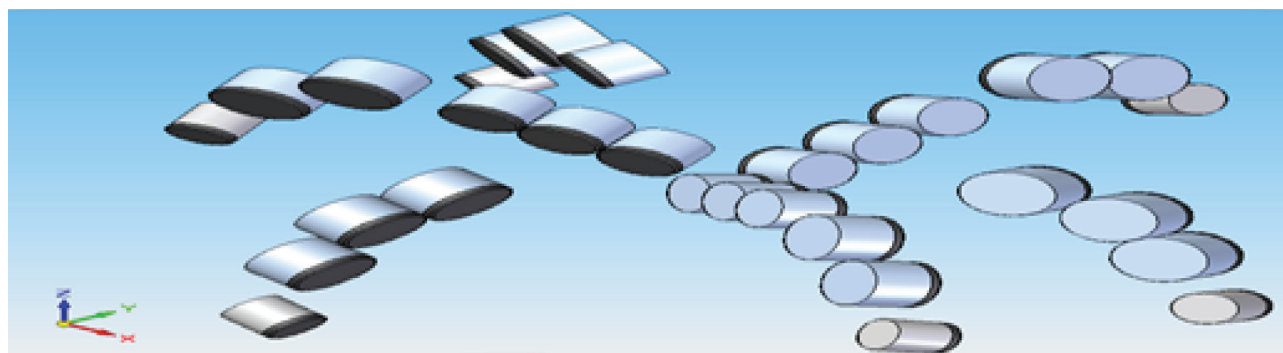
En el programa Solid Edge ST para situar cada uno de los cortadores, se debe realizar la operación de relación para que cada uno cuente con el ángulo correspondiente, esto se consigue relacionando la cara del cortador con el plano generado y después se debe relacionar con una función ángulo, la cual determinara el ángulo entre la cara y el plano que la compone y así obtener el ángulo *back rake*, esto se realizara la cantidad de veces que sea necesario para que los cortadores cuenten con la configuración predeterminada en el proceso de diseño. Los ángulos son determinados dependiendo

de la posición de los cortadores, que tiene un rango de 15° a 30° grados y establece también la agresividad que tendrá el corlador, como se observa en la figura 6. Finalmente con las correspondientes operaciones del programa se obtiene el modelo 3D de la broca PDC en su forma definitiva (Figura 7).

2.5. Análisis computacional del comportamiento mecánico

Los cortadores que entran en la formación en un instante específico de tiempo en el cual la broca se somete a fuerzas variables a medida que perfora, no solo se debe al cambio de litología sino al constante cambio de contacto entre los cortadores y la roca. Por último se hace necesario conocer el comportamiento mecánico de la broca en un instante donde todos los cortadores se encuentran en contacto, ya que este será la condición crítica en donde la broca y sus componentes se verán sometidos a mayores cargas.

Figura 6. Cortadores 3D



Para determinar la carga máxima se realizó un acoplamiento de los tres instantes para cada uno de los modelos de la broca, obteniendo que todos los cortadores en la broca estuviesen en contacto con la formación en el mismo instante

y así obtener el resultado del valor de la carga total, para ser incluida en el análisis por elementos finitos. Básicamente lo que representara la carga máxima es la suma de las fuerzas en los tres instantes para cada modelo de la broca.

Figura 7. Modelado de la broca PDC

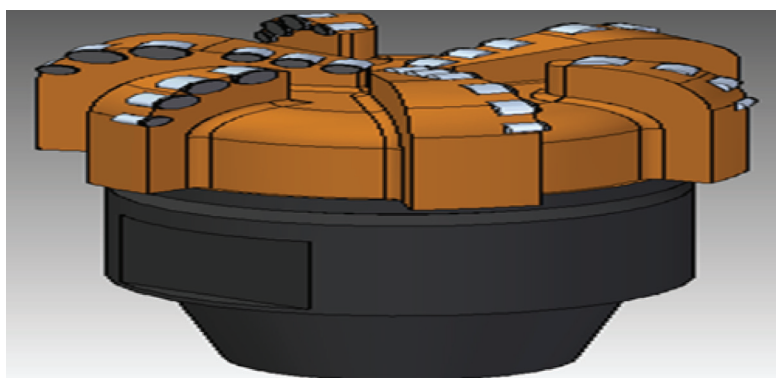


Tabla 4. Carga máxima

Fuerza presentes en la broca				
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	
WOB	60740,62	66343,29	72642,09	N
Torque	3891,75	4081,52	4287,89	N*m
Fuerza Total	77728,29	84509,72	92062,67	N

La tabla 4 muestra las magnitudes de las fuerzas en cada modelo de la broca cuando todos los cortadores están en contacto con la formación en el mismo instante.

Resultados obtenidos en el programa

Una vez obtenidas las fuerzas que actúan sobre cada uno de los cortadores, estas se integran a los parámetros requeridos por el programa de elementos finitos, para el correspondiente análisis de esfuerzos y deformación que se presentan tanto en el cuerpo de la broca como en los cortadores.

En la Figura 8 se observa la Discretización en elementos finitos del modelo de la broca.

Los resultados de esfuerzo promedio obtenidos debido a las fuerzas aplicadas en los cortadores de 13, 16 y 19 mm para los tres modelos de la broca, se muestran en la tabla 5, se advierte que el pico máximo de esfuerzo se encuentra en el cortador número 22 que corresponde a un diámetro de 19 mm ubicado en la cuarta aleta

en la parte del hombro como se observa en la Figura 9, los cortadores que se encuentran en esa misma sección exponen valores muy cercanos. Los valores mínimos se evidencian en los cortadores con un diámetro de 13 mm que se encuentran hacia la parte más externa en la sección del *gage* con un valor entre 60 a 80 Mpa. El factor de seguridad para los cortadores con mayor esfuerzo es:

Ecuación 8. Factor de seguridad

$$F.S = \frac{\sigma_{falla}}{\sigma_{permisible}}$$

$$F.S = \frac{751Mpa}{190,09Mpa}$$

$$F.S = 3,95$$

Tabla 5. Esfuerzo promedio en los cortadores.

Promedio de esfuerzos (Mpa)
190,09
171,21
152,33
127,15
95,68
76,79
57,91
39,03
20,14
1,26

Figura 8. Discretización de la broca

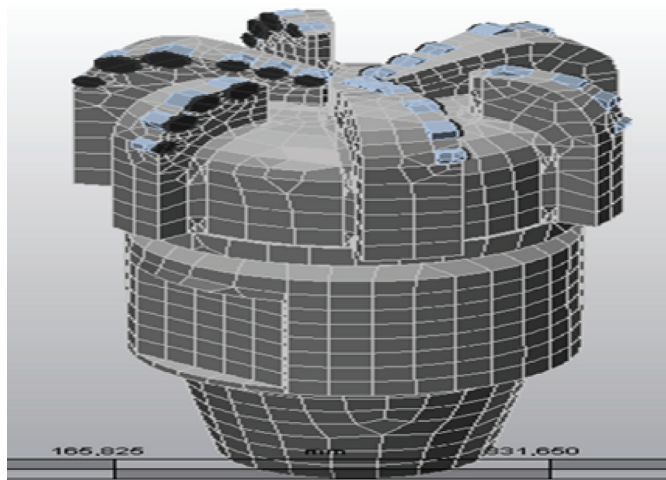
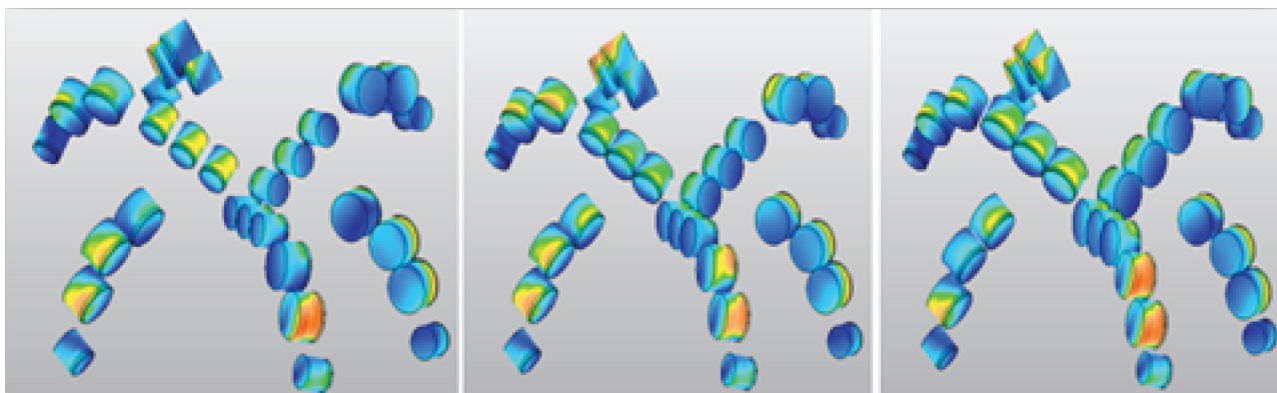


Figura 9. Esfuerzo en los cortadores para los modelos 1, 2 y 3 de la broca.



Ahora se examinara el conjunto completo de la broca para así poder considerar en el análisis las variables como el WOB (peso en la broca) y el TOB (torque en la broca), estos se muestran

aplicados en la Figura 10, como resultado se pueden observar los esfuerzos presentes en las aletas específicamente en la zona del gage. Figura 11.

Figura 10. Modelo de cargas y restricciones en la broca

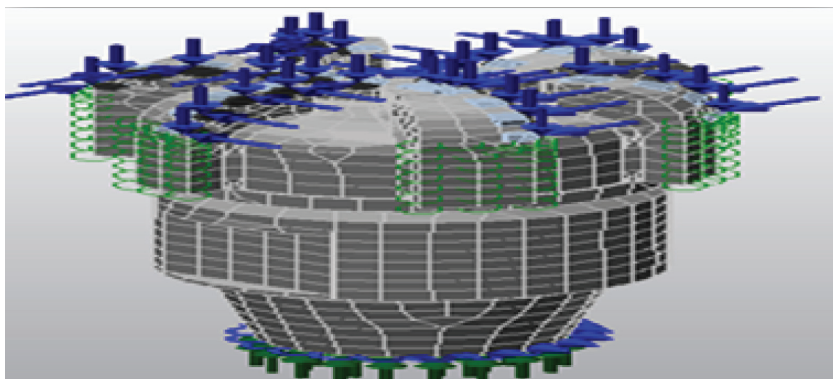
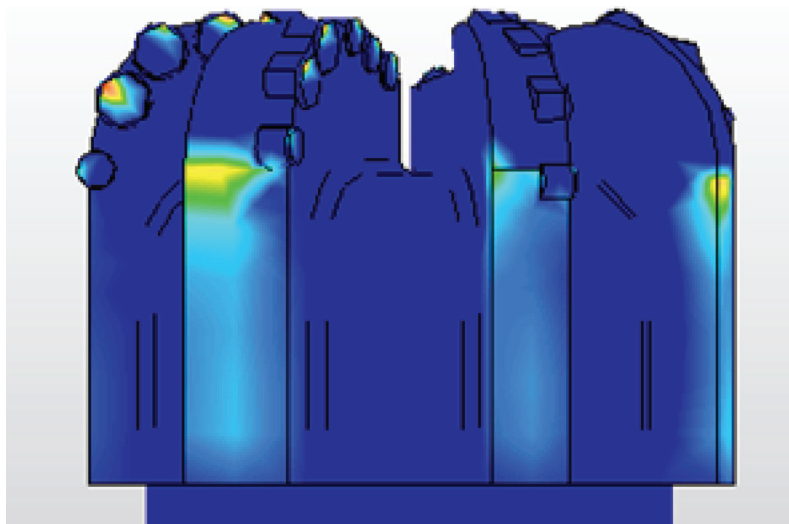


Figura 11. Esfuerzos en la broca



2.6 Evaluación de los resultados de acuerdo a los parámetros de diseño

La evaluación de los resultados con base en parámetros de diseño busca aclarar el comportamiento que tendrá la broca en el proceso de perforación, para esto se consideran los siguientes: ángulo de tendencia y concepto de equilibrio en una broca PDC que son dos de los parámetros que se evalúan en el diseño de una broca de este tipo.

Ángulo de tendencia

Durante la perforación se ha observado en algunos casos que las brocas tienden a desviarse a medida que penetran, esto es conocido como “*walk tendency*” que se manifiesta en todas las brocas debido a la configuración de las fuerzas anteriormente mencionados, esta desviación es indicada mediante un ángulo que mide la tendencia que tiene la broca para desplazarse hacia la izquierda o derecha. A lo largo del perfil se encuentran los cortadores donde cada uno tiene ciertas características definidas, suponiendo que todos los cortadores tienen el mismo *back rake*, se define entonces el ángulo de tendencia en función de la estructura del perfil la cual se divide en dos partes, la estructura interior y la estructura exterior. La ecuación 8 relaciona las características del perfil de la broca y las propie-

dades de la roca para determinar el ángulo de tendencia de esta.

Ecuación 8. Ángulo de tendencia

$$\alpha = \arctan \frac{2(C - G)}{\tan(wc + \theta f)(C + G)}$$

Un valor obtenido de $\alpha = -33^\circ$, quiere decir que la broca tiene una tendencia a desviarse hacia la izquierda debido a la configuración de corte. La ecuación muestra que a medida que la estructura interior tiende a igualarse con la estructura exterior el ángulo de tendencia se disminuye, y cuando la estructura interna es mayor que la estructura externa el ángulo de tendencia se presenta hacia la derecha.

Incluyendo el *gauge* como componente, este efecto se reduce drásticamente debido al área de contacto que proporciona para el equilibrio de las fuerzas, logrando una estabilización de la broca en un modelo de equilibrio global.

Equilibrio global para brocas PDC

El equilibrio global es el concepto utilizado en el diseño de brocas PDC, que se basa en determinar comportamientos característicos de la

broca debido a las fuerzas que se presentan en cada uno de los cortadores y que su diferencia en magnitudes establece ciertas reacciones que deben ser consideradas y controladas para generar un equilibrio en la herramienta. Este concepto abarca todo el desarrollo del proyecto de investigación debido a que integra las fuerzas presentes en la interacción cortador-roca, considerando la cantidad de estos y la geometría general de la broca, para poder calcular el desequilibrio existente en los ejes X, Y y Z, lo cual ocasiona desplazamientos y momentos flectores que deben ser reducidos para evitar que la broca genere desviaciones de pozo. Para que un objeto (broca) este en equilibrio, no solo es necesario que la suma de las fuerzas que actúan en el sean igual a cero, sino que también la suma de los momentos respecto a cualquier punto o eje sea igual a cero. La formulación matemática para la obtención de los resultados de momentos flectores debido a la fuerza normal y la fuerza de corte se describe en la ecuación 9.

Ecuación 9. Momentos flectores.

$$\sum M_{x,y,z} = \sum (r_{x,y,z} * F_{normal})$$

Aplicando la formulación se obtienen los momentos flectores que actúan en un instante en la broca, los cuales se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Momentos Flectores

	Momentos flectores	
	Momento flector en Y (N*m)	Momento flector X (N*m)
Modelo 1	-46,9235707	-1,628473
Modelo 2	6,7227369	0,5420113
Modelo 3	61,9895523	5,0403583

3. CONCLUSIONES

El método matemático que se implementó para obtener la magnitud de las fuerzas existentes en la interacción cortador-roca cuenta con la inclusión de nuevas variables como; Presión de lodo, compresibilidad de la roca, ángulo de fricción y ángulo de falla de la roca, las cuales permiten al modelo obtener una mayor aproximación al comportamiento real de una broca PDC. Con el método de elementos finitos se obtiene como resultado de análisis valores de esfuerzo en las zonas más críticas de la broca como son el *gage* y los cortadores con valor máximo de 190 MPa, valor que no supera el límite de falla del material con que son fabricados. Con respecto a los tres modelos de la broca, el modelo 1 presenta los mayores valores de esfuerzo 129,01 MPa, un comportamiento de equilibrio global medio, y menor valor penetración en la formación debido al tamaño de 13 mm en los cortadores ubicados en el cono, el modelo 2 presenta valores medios de esfuerzos 127,34 MPa en los cortadores ubicados en el cono y tiene el comportamiento más equilibrado con respecto a los otros dos modelos y un valor medio de penetración, por último el modelo 3 expone resultados de esfuerzo de menores de 124,27 MPa en el cono, además presenta mayor penetración y desequilibrio con respecto a los modelos.

Los tres modelo presentan un ángulo de tendencia con valor de -33° , que es muy característico en este tipo de brocas y este disminuye en función del tamaño del *gage*. Por cada 100 psi de aumento en la presión de lodo con un ángulo de back rake de 15° se obtiene un incremento en la fuerza de corte de 9,81 N y en la fuerza normal de 21,22 N, si el ángulo cambia a 30° la fuerza de corte se incrementara en 22,58 N y en la fuerza normal de 25,05 N. En lo referente al tamaño del ángulo de *back rake* un valor de 15° se considera un corte agresivo con mayor penetración en la formación, un valor de 30° es un corte menos agresivo con menor penetración, en esto es necesario tener en cuenta el papel preponderante de influencia de la litología, pues como se mencionó las propiedades mecánicas de la roca inciden en la tasa de penetración.

REFERENCIAS

- Gerbaud L, & Menand S. (2006). How the Bit Profile and Gages Affect the Well Trajectory, paper IADC/SPE 98988
- Beer, F. & Russell, J. (2007). Mecánica vectorial para ingenieros Estática.
- BEER, F., Russell, J. (2008) Elliot. Mecánica de Materiales.
- Bertagnolli, K. Polycrystalline diamond compact (PDC) design methodology utilizing strain energy capacity. 2001.
- Clayton, R., Shilin C., & Guy L., HES-Security DBS, New Bit Design, Cutter Technology Extend PDC Applications to Hard Rock Drilling. 2005.
- Iskander S. (2003). Selection and evaluation of polycrystalline diamond compact (PDC) bits J.J
- Azar (2002). Drilling Engineering. Houston. PennWell.
- Mott, R. (2008). Diseño de elementos de máquinas. Cuarta edición. México: Pearson educación.
- Navarro R., Suárez L. (2005). Vibraciones en una sarta de perforación: Problemas de control. Programa de Investigación en Matemáticas Aplicadas y Computación Instituto Mexicano del Petróleo.