

Efecto de las altas velocidades en la salida del fluido a través de las boquillas sobre la ROP durante la perforación en formaciones duras

Jhon Eduard Moreno Díaz

Christian Felipe Duran Pinto

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero de petróleos

Director

Wilson Raúl Carreño Velasco

Ingeniero de petróleos

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería de Petróleos
Bucaramanga**

2018

Dedicatoria

A Dios, por permíte cumplir mis metas, por darme a mi familia, por siempre guiar e iluminar mi camino, por siempre estar cuando más lo necesite y llenar mi vida de personas maravillosas.

A mis padres Nurfreya Díaz Garcés y Pedro Denis Moreno Caicedo, por ser mi motivación cada día porque con su esfuerzo y sacrificio me dieron la posibilidad de lograr lo que hasta hoy he conseguido y por su entera confianza y por darme tanto amor, me han dado más de lo que yo pudiera pedir.

A mis hermanos Ana Elizabeth Moreno Días y Pedro Luis Moreno Morante porque además de ser mis hermanos son mis mejores amigos y sé que puedo contar con ellos incondicionalmente y por estar hay siempre cuando los necesito.

A mis hermanos Omar Andrés Asprilla fuentes y Marco Antonio Beltrán que desde el cielo siguen mis pasos y por brindarme tantos momentos chéveres al lado de ustedes, me quedan muchas enseñanzas y la alegría, de que Dios me haya permitido conocer grandes personas como ustedes.

*A mi madrina Ermencia Fuentes Rodríguez por ser mi segunda
madre y brindarme tanto amor.*

*A mis amigos del Choco Dareyl, Javier, Jean carlos, Jorge, Shirley,
Natalia, Charly, Wiler, Marcel, Keimer, Juan David, Yonier, Davinson,
Yefer, Yoimar, Johana, Yasmína, Lesty, Lizeth Machado, Nidia, Kevin
moreno, Henry Ramírez, José Edwin, Guille, Jefferson, Kelly Patricia, el
ingeniero Andrés por que más que amigos son mis hermanos y a pesar
de que me ausente en ocasiones, la amistad y el cariño sigue siendo el
mismo y sé que puedo contar con ellos.*

*A mis amigos en Bucaramanga Sharon, Daniel, Alejandro, Sergio,
Ivan, Juan Vera, Juan Balcucho, Javier Cabal, Karol flores, Angie Díaz,
Ingríd, María Pico, Liz bautista, Vanessa Torres, Tania, Jesús
Hernández, Karol Meneses, Jean Motta, Juan Palomino, Felipe Duran,
Ángela Moreno, Baíron, Sebastián Ferreira, Jesús Hernández, Andrés
Cuaran, Ian Campaña, Marlon por convertirse en esa familia que
siempre está apoyándome y pasando buenos y malos momentos a mi
lado*

JHON EDUARD MORENO DIAZ

A Dios, por darme el sentido de la vida para así cumplir cada uno de mis propósitos y sueños junto a las personas que hacen parte de la familia que él mismo me escogió.

A mis padres Claudia Pinto y René Durán quienes son el sinónimo más claro de pasión y perseverancia para motivar, orar, acompañar, exaltar y luchar junto a mí con tanto amor que incluso a la distancia estaban presente en el día a día de este sueño.

A mi hermano, Stiven Alejandro Durán Pinto quien a pesar de su edad ha estado al tanto de mi recorrido universitario, tanto en su papel de hermano como de mejor amigo, siendo él base sólida para mis decisiones.

A mis amigos en Sogamoso, Boyacá; Adolfo Chisino, Nicolás Quintero, Maycol Castro, Farid Rodríguez, Leonardo Rojas, Daniela Pulido, Natalia Lugo, Jhon Rodríguez, Juliana Montenegro, quienes desde sus hogares han logrado transmitirme su apoyo y su positivismo, son mi recarga de alegría en cada momento compartido, es un honor llamarlos mi otra familia.

A mis amigos en Bucaramanga, Juan Sebastián Palomino, Reinaldo Orozco, Mauricio Sánchez, Andrés Cera, William Contreras, Sergio

*Collazos, Sebastián Henríquez, Jhon Eduard Moreno, Audrey Viera,
María Angélica Yunez, Gabriela Daza, Fidel Hernández, Samuel
Méndez, personas que me han aportado lo mejor de cada uno, con el
único propósito de verme en total plenitud, agradezco a Dios por la
oportunidad de conocerlos, ser parte de mi familia y estar conmigo en
cualquier situación.*

CHRISTIAN FELIPE DURÁN PINTO

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería de Petróleos por brindarnos los conocimientos que hemos adquirido, por formarnos como profesionales capaces e íntegros, además de permitirnos aprender de grandes profesionales y grandes seres humanos.

Al Ingeniero Wilson Raúl Carreño, por su apoyo, instrucciones y tiempo, por permitirnos hacer este trabajo con su ayuda y su motivación, por ser un gran profesional y una excelente persona.

A los Ingenieros Fabián Becerra, Sandro Mendoza y su equipo de trabajo en la compañía Baker Hugues, por darnos las bases y soporte que necesitamos, por brindarnos su tiempo y colaboración que ha sido fundamental para poder desarrollar este trabajo.

Tabla de contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
2. MARCO TEÓRICO	20
2.1 Broca.....	20
2.2 Conceptos relacionados con la hidráulica de la broca	20
2.2.1 Boquillas	20
2.2.2 Potencia de superficie	22
2.2.3 Potencia del fondo del pozo.....	23
2.2.4 Potencia hidráulica	24
2.2.5 Fuerza de impacto hidráulica.....	25
2.2.6 Sistema hidráulico de brocas de corte fijo.....	25
2.2.7 Pump off force	26
2.2.8 Tasa de corte de la boquilla o nozzle shear rate	27
2.3 Energía mecánica específica (MSE).....	28
2.4 Conceptos y parámetros que influyen en la energía mecánica específica	29
2.4.1 Rate of Penetration (ROP).....	29
2.4.2 WOB (Weight on bit)	30
2.4.3 Velocidad de rotacion (RPM).....	30
2.4.4 Caudal o flujo	31
2.4.5 Torque.....	31
2.4 Energía hidromecánica	32

2.4.1 Drilling specific energy (DSE)	32
2.4.2 Hydro mechanical specific energy (HMSE).....	33
2.5 Propiedades mecánicas de la roca relacionada con la perforación de pozos.....	36
2.5.1 Propiedades elasticas	36
2.5.2 Resistencia de la roca	37
2.6 Efecto venturi	39
2.7 Formación.....	40
2.7.1 Dureza de las formaciones.....	40
2.8 Formacion mirador	41
2.9 Campo floreña	42
2.9.1 Ubicación geografica.....	42
3 MÉTODO PARA ANALIZAR LA RELACIÓN ENTRE LAS ALTAS VELOCIDADES EN LA SALIDA DEL FLUIDO Y LA ROP EN FORMACIONES DURAS	43
3.1 Criterios para el estudio del efecto de las altas velocidades en la salida del fluido en formaciones duras.....	44
4. Casos de estudio de corridas de brocas perforadas en la formación mirador en Colombia .	46
4.1 Parámetros observados	46
4.2 Corridas de brocas estudiadas.....	47
5 RESULTADOS Y ANÁLISIS	48
5.1 Corrida A – pozo 1 (broca impregnada).....	49
5.1.1 Caudal vs profundidad.....	49
5.1.2 Velocidad a través de las boquillas vs profundidad	50
5.1.3 MSE vs profundidad.....	51

5.1.4 ROP vs profundidad 52

5.1.5 DSE vs profundidad..... 53

5.1.6 Fuerza de Impacto (FJ) vs profundidad 54

5.1.7 WOB vs profundidad..... 55

5.1.8 Tasa de Corte de las boquillas vs profundidad 56

5.2Corrida B – pozo 2 (broca PDC) 57

5.2.1 Caudal vs profundidad..... 57

5.2.2 Velocidad a través de las boquillas vs profundidad 58

5.2.3 MSE vs profundidad 59

4.2.4 ROP vs profundidad 60

5.2.5 DSE vs profundidad..... 61

5.2.6 Fuerza de impacto (FJ) vs profundidad 62

5.2.7 WOB vs profundidad..... 63

5.2.8 Tasa de cortes de las boquillas vs profundidad 64

6 CONCLUSIONES 65

7 RECOMENDACIONES..... 67

REFERENCIAS 68

Lista de tablas

Tabla 1 criterios para el estudio de las altas velocidades en la salida del fluido en formaciones duras..... 44

Tabla 2 Información de las corridas..... 47

Lista de figuras

Figura 1. Cálculo del factor lambda tomado de: Armenta, M (2008). Identifying Inefficient Drilling Condition Using Drilling Specific Energy..... 33

Figura 2. Caudal vs Profundidad. Corrida A. Pozo 1. Broca Impregnada..... 49

Figura 3. Velocidad a través de la boquilla vs Profundidad. Corrida A. Pozo 1. Broca Impregnada 50

Figura 4. MSE vs Profundidad. Corrida A. Pozo 1. Broca Impregnada..... 51

Figura 5. ROP vs Profundidad. Corrida A. Pozo 1. Broca Impregnada 52

Figura 6. DSE vs Profundidad. Corrida A. Pozo 1. Broca Impregnada 53

Figura 7. FJ vs Profundidad. Corrida A. Pozo 1. Broca Impregnada. 54

Figura 8. WOB vs Profundidad. Corrida A. Pozo 1. Broca Impregnada..... 55

Figura 9 Tasa de corte de las boquillas vs Profundidad. Corrida A. Pozo 1. Broca Impregnada 56

Figura 10. Caudal vs Profundidad. Corrida B. Pozo 2. Broca PDC 57

Figura 11. Velocidad a través de las boquillas vs Profundidad. Corrida B. Pozo 2. Broca PDC. 58

Figura 12. MSE vs Profundidad. Corrida B. Pozo 2. Broca PDC. 59

Figura 13. ROP vs Profundidad. Corrida B. Pozo 2. Broca PDC..... 60

Figura 14. DSE vs Profundidad. Corrida B. Pozo 2. Broca PDC. 61

Figura 15. FJ vs Profundidad. Corrida B. Pozo 2. Broca PDC..... 62

Figura 16. WOB vs Profundidad. Corrida B. Pozo 2. Broca PDC 63

Figura 17 Tasa de corte de las boquillas vs Profundidad. Corrida B. Pozo 2. Broca PDC 64

Lista de apéndices

Los apéndices están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca

UIS

Resumen

Título: Efecto de las altas velocidades en la salida del fluido a través de las boquillas sobre la ROP durante la perforación en formaciones duras

Autores: Jhon Eduard Moreno Diaz

Christian Felipe Duran Pinto**

Palabras clave: ROP, fluidos, Pump off forcé, WOB

Descripción:

Este trabajo de investigación presenta un método para analizar la relación existente entre las altas velocidades en la salida del fluido a través de las boquillas y la ROP en formaciones duras. Para lo cual, también se tuvo en cuenta fenómenos estrechamente relacionados como el Pump Off forcé y la erosión en las paredes del pozo.

Primero, se explica los conceptos enfocados en la contextualización en términos comunes como lo son: términos referentes a la formación, conceptos básicos de hidráulica y los factores que afectan la ROP.

Posteriormente se analizaron datos de corridas de brocas que han hecho perforaciones en la formación Mirador, la cual es una formación de alta dureza. Sin embargo, se examinaron corridas en las que: la sección perforada fuera de tipo arenisca debido a la alta dureza que presentan la mismas, la información estuviera pie a pie, el caudal variara y no se evidenciara problemas operacionales; aumentando de este modo, la confiabilidad de los resultados presentados.

Finalmente se realizaron comparaciones de dos corridas (broca Impregnada y triconicas) en dos diferentes pozos donde se observa el caudal, velocidad a través de las boquillas, MSE, ROP, DSE, fuerza de impacto, WOB y tasa de corte de las boquillas. Cada una de estas variables se analizó en relación a la profundidad, y finalmente se llega a la conclusión de que las altas velocidades en la salida del fluido a través de las boquillas no genera una mejora en la ROP y que los fenómenos asociados a estas altas velocidades en la salida fluido, como lo son: el Pump off forcé y la erosión en las paredes del pozo no presentan un efecto considerable sobre el desempeño de la broca.

* Trabajo de grado

** Facultad de Físicoquímica. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Wilson Raúl Carreño Velasco, Ingeniero de petróleos

Abstract**Title: Effect of high velocity on fluid exit through nozzles on ROP during drilling in hard formations****Authors:** Jhon Eduard Moreno Diaz

Christian Felipe Duran Pinto**

Keywords: ROP, fluids, Pump off forcé, WOB**Description:**

This thesis paper presents a method to analyze the relationship between the high velocities at the fluid outlet through the nozzles and the ROP in hard formations. For which, it also took into account closely related phenomena such as Pump Off Force and erosion in the walls of the well.

First, it explains the concepts focused on the contextualization in common terms such as: terms referring to formation, basic concepts of hydraulics and the factors that affect the ROP.

Subsequently, data from drill runs that have drilled in the Mirador formation, which is a high hardness formation, were analyzed. However, runs were examined in which: the perforated section was sandstone type due to the high hardness presented by the same, the information was feet to feet, the flow rate varied and there were no operational problems; thus increasing the reliability of the results presented.

Finally, comparisons were made of two runs (Impregnada and triconicas bits) in two different wells where the flow rate, velocity through the nozzles, MSE, ROP, DSE, impact force, WOB and nozzle shear rate were observed. Each of these variables was analyzed in relation to the depth, and finally it is concluded that the high velocities in the exit of the fluid through the nozzles does not generate an improvement in the ROP and that the phenomena associated with these high velocities in the fluid outlet, as they are: the pump off force and the erosion in the walls of the well do not have a considerable effect on the performance of the bit.

* Bachelor thesis

* * Facultad de Fisicoquímica. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Wilson Raúl Carreño Velasco, Ingeniero de Petróleos

Introducción

Para empezar, se tiene en cuenta el concepto del efecto Venturi, en el que se establece que un fluido en movimiento, que se desplaza a través de un conducto, disminuye su presión al aumentar la velocidad. Este concepto podría ser aplicado durante la perforación y de esta manera disminuir la presión de confinamiento a la que está sometida la roca, específicamente, en el área de la cara de la broca. Este fenómeno afectaría favorablemente la Velocidad de perforación o la ROP (por sus siglas en inglés).

Al estudiar este fenómeno, se generó la necesidad de observar un parámetro que nos representara la eficiencia que se obtiene durante determinada perforación; para analizarlo en la sección perforada donde están las altas velocidades en la salida del fluido, y es así, donde llega a coalición el concepto del MSE (Mechanical Specific Energy). Este se define como la relación entre la energía de entrada y el volumen de roca removido en un proceso de perforación. Se cree que con el monitoreo y ajuste del MSE, se incrementa la eficiencia y la seguridad durante la perforación. Aun así, el MSE tiene la desventaja de que existan incertidumbres relacionadas a ciertos aspectos, y son éstas la primordial la ausencia de evaluación con respecto a la Energía específica hidráulica. Es así que, debido a este fenómeno, el estudio conlleva a tener en cuenta los conceptos de hidráulica también.

Se incluyeron otros conceptos como: el Hydromechanical Specific Energy (HSME) y el Drilling Specific Energy (DSE), que desde punto de vista conceptual ambos se refieren a la cantidad de energía requerida para destruir y remover debajo de la broca un volumen unitario de roca. Estos parámetros son diferentes del MSE, ya que incluyen un componente hidráulico, y su

diferencia se encuentra en que el HMSE incluye un factor denominado factor Dummy que depende de variables relacionadas con la geometría de la broca en cuestión.

Basados en el estudio teórico de estos parámetros, y de otros como: el caudal, velocidad a través de las boquillas, ROP, fuerza de impacto, WOB y tasa de corte de las boquillas se aplicará cada uno de ellos, y se analizará en relación con la profundidad en dos corridas diferentes, en diferentes pozos; los cuales fueron perforados en la formación Mirador. Y finalmente determinar cómo se relacionan las altas velocidades en la salida del fluido con la ROP. De este modo se deducirá si este efecto Venturi puede ser aplicable durante la perforación en formaciones duras, y además explicar cómo se vinculan los fenómenos del Pump off forcé y la erosión de las paredes del pozo con estas secciones donde la velocidad en la salida del fluido a través de las boquillas son altas.

2. Marco teórico

2.1 Broca

La broca de perforación es la herramienta cortadora de roca localizada en el extremo inferior de la sarta de perforación, el principal objetivo de la broca es cortar o triturar la formación durante el proceso de la perforación rotaria. Su función es perforar los estratos de la roca mediante el vencimiento de su esfuerzo de compresión y de la rotación de la broca. En general las brocas se rigen por dos principios básicos para la trituración de la roca: excediendo la resistencia al corte y la fuerza compresiva (López, 2009).

Para que la broca logre vencer la resistencia al corte de la roca, involucra el uso de un diente o cortador, el cual, al introducirse dentro de la formación y debido a la rotación crea fracturas que permite cortar o romper en pequeños fragmentos la roca haciendo más fácil su remoción; para que la roca falle o se rompa se requiere que la carga que se aplica sobre la roca exceda la fuerza compresiva de ésta. La carga deberá permanecer sobre la superficie de la roca el tiempo necesario para que ocurra la falla, la cual no se presentará si la fuerza compresiva de la roca excede a la carga o si ésta es removida antes de ser transmitida del diente hacia la formación. Lo anterior, es básico para la perforación de rocas duras con grandes pesos sobre la broca y bajas velocidades de rotación (López, 2009).

2.2 Conceptos relacionados con la hidráulica de la broca

2.2.1 Boquillas

Las boquillas fueron introducidas en los campos petrolíferos en 1948. Estas fueron necesarias para incrementar la limpieza del fondo del pozo en pozos profundos. Anterior a las boquillas, el

curso del fluido en las brocas era a través de un agujero perforado en el centro de la broca y el fluido de perforación iba directamente de la sarta de perforación al anular.

Este “curso convencional del agua” no tenía el poder necesario para levantar los recortes y asistir el proceso de perforación.

Tanto las brocas triconicas como las PDC tienen huecos que permiten instalar diferentes tamaños de boquillas para poder obtener la hidráulica apropiada. La mayoría de las brocas triconicas usan 3 o 4 boquillas, mientras que las PDC usualmente contienen de 6 a 9 boquillas. El área de flujo de todas las boquillas debe ser determinada separadamente, luego añadirlas juntas.

$$\text{area de la boquilla (in}^2\text{)} = \frac{\text{tamaño de la boquilla}^2}{64} \times \pi$$

Como la velocidad del fluido a través de la boquilla es tan importante, esta debería ser calculada cada vez que una boquilla es instalada en la broca. La fórmula es:

$$V_n = \frac{418.3 \times Q}{\sum dj^2}$$

Donde:

V_n = Velocidad del fluido a través de la boquilla (ft/sec).

Q = velocidad de flujo (gal/min).

dj = tamaño de la boquilla (in).

Nota: ejemplo de cómo opera dj : $(11^2 + 12^2 + 13^2)$.

En formaciones suaves, el hueco es generado por la acción del chorro del fluido de perforación y la velocidad de perforación es limitada por los tiempos de conexión, desviaciones indeseables, y la carga del anular con recortes de perforación. En formaciones duras, la velocidad de perforación sería proporcional al peso sobre la broca, si la limpieza del hueco es adecuada. (Publications, December 2015).

2.2.2 Potencia de superficie

Para maximizar el programa de hidráulica, todos los aspectos concernientes al fluido de perforación y el equipo asociado deben ser considerados.

El primer componente en cualquier diseño hidráulico son los equipos de superficie y la potencia hidráulica disponible proveniente de ellos. Hay 2 factores límites en la Potencia hidráulica de superficie.

La primera es el rango de la tasa de flujo. El patrón de flujo a través del anular debería ser laminar, además el límite superior para la tasa de flujo es un número de Reynolds de 2000. La máxima velocidad en el anular será alrededor de los collares, y esta velocidad puede ser determinada calculando la “velocidad crítica” sobre esta sección. Además, operando las bombas al rango superior no es siempre aconsejable porque habrá más desgaste en las bombas y consumo de combustible.

El límite inferior es un rango donde hay suficiente limpieza del hueco. Este es determinado usando la velocidad a través de la tubería de perforación y la sección más grande del anular.

El segundo factor es la presión de operación de las bombas de lodo. La mayoría de las bombas pueden producir la presión requerida con pocos problemas. Sin embargo, debido a los diversos componentes asociados con el sistema de superficie (Standpipe, rotary hose, pulsation dampener, etc), la máxima presión de superficie es usualmente limitada a valores menores que la máxima presión de la bomba. (Publications, December 2015).

La disponible “potencia de superficie” es determinada por:

$$H_{ps} = \frac{P \times Q}{1714}$$

Donde:

Hps = potencia de superficie (hp)

P = presión de la bomba (psi)

Q = velocidad de flujo de la bomba (gal/min)

Una vez determinada la potencia de superficie, la distribución de potencia puede ser realizada:

$$H_{ps} = H_{pc} + H_{pb}$$

Donde:

Hpc = potencia de circulación (hp)

Hpb = potencia de la broca (hp)

2.2.3 Potencia del fondo del pozo

La determinación de la cantidad de limpieza que el hueco necesita para maximizar la velocidad de perforación, se basa en:

1. Fuerza de impacto hidráulica de la boquilla
2. Potencia hidráulica

Maximizar la Hpb (potencia de la broca) involucra minimizar la Hpc (potencia de circulación), o en otras palabras, la velocidad de flujo más baja y la presión en la bomba más alta, resultara en la más alta Hpb. Sin embargo, la “más baja velocidad de flujo” usualmente resultará en una inadecuada limpieza del hueco. Para compensar esto, la presión en el fondo del pozo puede ser incrementada usando boquillas más pequeñas. (Publications, December 2015).

2.2.4 Potencia hidráulica

La potencia hidráulica está basada en la teoría de que los cortes se eliminan mejor desde debajo de la broca, entregando la mayor potencia al fondo del pozo.

La cantidad de presión perdida en la broca, o caída de presión en la broca, es esencial en la determinación de la potencia hidráulica. La caída de presión en la broca es determinada por:

$$P_b = \frac{MD \times (VN)^2}{1120}$$

Donde:

P_b = Caída de presión en la broca (psi).

MD = Densidad de lodo (lb/gal).

Vn = velocidad del fluido a través de la boquilla (ft/sec).

Teniendo la pérdida de presión a través de la broca, se puede calcular la potencia hidráulica:

$$H_{hh} = \frac{P_b \times Q}{1714}$$

Donde:

H_{hh} = Potencia hidráulica (hp).

P_b = Caída de presión en la broca (psi).

Q = Caudal (gal/min).

Para optimizar la limpieza del fondo del pozo y la potencia hidráulica, es necesario seleccionar una velocidad de circulación y tamaños de boquillas que provoque que se gaste el 65% de la presión de la bomba, forzando al fluido a través de las boquillas de la broca.

(Publications, December 2015)

$$H_{hh} = 0,65 \times H_{ps}$$

2.2.5 Fuerza de impacto hidráulica

La fuerza de impacto hidráulica está basada en la teoría de que los cortes se remueven mejor desde debajo de la broca cuando la fuerza del chorro de los fluidos que sale de las boquillas es la mayor (Publications, December 2015). La fuerza de impacto es determinada por:

$$H_{if} = \frac{MD * Q * V_n}{1930}$$

Donde:

H_{if} = Fuerza de impacto hidraulica (lbs).

MD = Densidad del lodo (lb/gal)

Q = Velocidad de flujo (gal/min)

V_n = Velocidad del fluido a través de la boquilla (ft/sec)

2.2.6 Sistema hidráulico de brocas de corte fijo

El sistema hidráulico para brocas de cortes fijo se basa en la capacidad del fluido de perforación para remover los cortes debajo de los cortadores y enfriar la broca. El volumen del fluido es crítico para el rendimiento de la broca PDC. El volumen y la velocidad del fluido son críticos para el rendimiento de la broca con diamantes.

Los componentes principales de un sistema hidráulico de brocas de cortes fijo son:

1. Tasa de flujo – Q (gal/min) and V (ft/min).
2. Características del fluido de perforación – MD (lb/gal), YP (lbs/100ft²) y viscosidad plástica (cps).

3. Pérdida de presión – a través de la cara de la broca (broca con diamantes) o a través de las boquillas. (Brocas PDC).
4. El área total de flujo (TFA) – el lugar del tamaño de las boquillas (Publications, December 2015).

Un parámetro muy importante en las brocas de cortes fijo es la Potencia hidráulica por pulgada cuadrada (Hydraulic Power Per Square Inch) o HSI. Ésta es calculada usando el Hhp (Potencia hidráulica):

$$HSI = \frac{H_{hp}}{A}$$

Donde:

H_{hp} = Potencia hidráulica (hp).

A = Área de la broca (in^2).

Si el área de la broca no está dada, ésta puede ser calculada usando:

$$A = \pi \frac{d^2}{4}$$

Donde:

A = Área de la broca (in^2).

d = Diámetro de la broca (in)

2.2.7 Pump off force

El pump off force sigue el patrón de la tercera ley de Newton “para cada acción, hay una reacción igual y opuesta”. En consecuencia el WOB efectivo se reduce. El pump off force es

equivalente a la fuerza de impacto (FJ) ejercida por el fluido en la formación (Vegar Berg & Saether Tveit, 2016). La fuerza de impacto se expresa de la siguiente manera:

$$FJ = 0,000516MWQV_n$$

Donde:

FJ = Fuerza de impacto (lbs).

MW = Densidad de lodo (ppg).

Q= Caudal (gal/min).

2.2.8 Tasa de corte de la boquilla o nozzle shear rate

El gradiente de velocidad medido a través del diámetro de un canal de flujo de fluido, ya sea una tubería, un anular o cualquier otra forma. La tasa de corte es la tasa de cambio de la velocidad a la cual una capa de fluido pasa sobre una capa adyacente.

Para calcular la tasa de corte de las boquillas se hace uso de la siguiente ecuación:

$$\text{tasa de corte de las boquillas } (sec^{-1}) = \frac{96 v}{TFA}$$

Donde:

V = Velocidad del fluido a través de las boquillas (ft/s).

TFA = Área total del fluido o Total fluid Área (in^2).

Las tasas de cortes de las boquillas menores a $100,000 sec^{-1}$ generan muy poca erosión en el pozo. Contrariamente a lo que sucede cuando las tasas de corte de las boquillas superan este valor,

que generan un volumen considerable de erosión en el pozo (Chemierinski, Oil resources, & Robinson, 1995).

2.3 Energía mecánica específica (MSE)

La energía específica o la densidad de energía es un parámetro importante para caracterizar la eficiencia de perforación, y ayudar a analizar la energía utilizada para remover un volumen unitario de roca en una unidad de tiempo. Este parámetro no sólo ayuda para seleccionar los parámetros de perforación, sino que también ayuda a diseñar brocas de manera más eficiente. Teale definió el término energía específica de una broca como la energía requerida para remover un volumen unitario de roca (Teale, 1965).

$$SE = \frac{\text{Energía de entrada}}{ROP \text{ de salida}}$$

Usando esta definición básica de la energía específica, Teale derivó la ecuación para calcular MSE considerando el trabajo axial y torsional que presenta la broca cuando está removiendo un volumen unitario de roca. Teale propuso calcular MSE basado en sus dos componentes “empuje” y “rotación” de la siguiente forma:

$$MSE = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120 * \pi * RPM * T}{A_B * ROP}$$

Donde:

MSE = Energía mecánica específica (psi).

WOB = Peso sobre la broca (lbf).

A_B = Área de la broca (in^2).

RPM = Numeros de vueltas en un minuto (Rev/min).

T = Torque (ft- lbs).

ROP = Velocidad de penetración (ft/hr).

Basado en observación de campo. Dupriest y Koedritz asumieron una eficiencia de perforación uniforme igual al 35% independientemente del tipo de la broca o del WOB (Armenta, 2008).

Incluyendo esta suposición en la ecuación de Teale se tiene que:

$$MSE = 0.35 * \left(\frac{WOB}{A_B} + \frac{120 * \pi * RPM * T}{A_B * ROP} \right)$$

Teale concluyó que la perforación alcanza el máximo rendimiento cuando la energía específica se aproxima al confinamiento por esfuerzos compresivos (CCS) de la roca que se va a perforar. Entonces, el concepto de CCS de la roca y el de energía específica son ampliamente utilizados para optimizar los parámetros de perforación y para evaluar el rendimiento de la broca.

2.4 Conceptos y parámetros que influyen en la energía mecánica específica

2.4.1 Rate of penetration (ROP)

Es la velocidad a la cual la broca penetra en la formación. Normalmente medida en pies por hora y metros por hora. Una formación dura y abrasiva, como una arenisca bien consolidada puede presentar una rata de penetración muy baja a su vez que desgasta en gran medida la broca (Schlumberger, 2017). Esta variable es de gran importancia porque está directamente relacionada con la eficiencia de la perforación. Una alta ROP indica mejor desempeño del taladro y mayor productividad (Hedge, Daigle, Millwater, Gray, & The University of Texas, 2017).

Aunque si la ROP supera un valor crítico se producirían una masiva cantidad de recortes de la formación que serían muy difíciles de retirar por acción del lodo, lo que terminaría en una posterior reducción de la ROP. (Heydarshahy, Karekal, & Petroleum Exploration and Development, 2017).

2.4.2 Weight on bit (WOB)

Peso de la sarta que se descarga sobre la broca para ayudar en la perforación. El peso adecuado sobre la broca mantiene a esta sobre la formación de modo que este siempre en posición perpendicular al fondo del pozo. Cualquier variación en el peso sobre la broca puede afectar la tasa de penetración. Es importante mantener el peso correcto sobre la broca para tener la sarta de perforación en tensión y evitar la vibración que puede ocasionar desde daños leves a incluso quebrar la tubería de perforación. Demasiado peso sobre la broca en formaciones duras puede derivar en que se pueden quemar o quebrar los dientes de la broca; y, por otro lado, muy poco peso disminuye la velocidad de penetración (Gomez, 2016) En general, a mayor WOB, más rápida será la perforación (Heydarshahy, Karekal, & Petroleum Exploration and Development, 2017).

2.4.3 Velocidad de rotación (RPM)

Significa la cantidad de vueltas o revoluciones que da la broca en un minuto. En formaciones suaves se puede decir que la velocidad de perforación es directamente proporcional a la velocidad de rotación. En general, es un parámetro que afecta la velocidad de penetración, pero no tanto como el tipo de formación. El valor adecuado para la velocidad de rotación normalmente es encontrado a prueba y error. (Centala et al. 2011).

2.4.4 Caudal o flujo

El caudal es la cantidad de fluido de perforación que avanza por unidad de tiempo en distintos puntos del sistema de circulación de un taladro, su unidad de medida se encuentra en galones por minuto (GPM).

Altos caudales aumentan la energía hidráulica en la broca y con una mayor velocidad anular se lograra remover los recortes y pasarlos a través del espacio anular hasta la superficie, mejorando la limpieza del hueco y de la broca. (Heydarshahy, Karekal, & Petroleum Exploration and Development, 2017).

2.4.5 Torque

Es una medida de la resistencia a la rotación generada por la fricción entre la sarta de perforación o la tubería de revestimiento y la pared del pozo. Este parámetro de perforación es medido en libras fuerza por pie (lbf-ft), la magnitud del torque está en función de la tensión o compresión y el área de contacto con el pozo.

Incrementos en el torque pueden ser causados por:

- Aumento en el WOB
- Desgaste de la estructura de corte de la broca
- Pérdida o falla de los conos (en el caso de una broca tricónica)
- Limpieza pobre del hueco
- Desviación del hueco o trayectoria del pozo
- Fracturas formacionales.
- Huecos apretados, pega de la tubería o empaquetamiento de la sarta de

Perforación.

En esta situación los torques altos pueden llevar a pegas de tubería, incluso Llevar a parar la rotaria, y el riesgo de una falla en la tubería o “twist-off” (desenroscamiento). (Centala et al. 2011).

2.4 Energía hidromecánica

2.4.1 Drilling specific energy (DSE)

Históricamente, Mechanical specific energy ha sido utilizado para mejorar el rendimiento en la perforación con resultados mixtos.

Drilling specific energy es la cantidad de energía requerida para destruir y remover debajo de la broca un volumen unitario de roca. DSE es diferente de MSE porque este incluye un término hidráulico. DSE puede ser calculado de la siguiente manera:

$$DSE = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120 * \pi * RPM * T}{A_B * ROP} - \frac{1,980,000 * \lambda * HP_B}{ROP * A_B}$$

Donde:

DSE: Energía de perforación específica (psi).

1, 980,000 = Factor de conversión de unidades.

λ = Factor adimensional de la hidráulica en la broca dependiendo del diámetro de la broca. Se encuentra comprendido entre valores de 0 y 0,060

$\frac{HP_B}{A_B}$ = Relación de la potencia hidráulica de la broca y el área de la broca (hp/in²).

A_B = Área de la broca (in²).

WOB = Peso sobre la broca (lbf).

RPM = Números de vueltas en un minuto (Rev/min).

ROP = Velocidad de penetración (ft/hr).

T = Torque (lbs-ft).

En la figura 1 se presenta la gráfica que permite calcular el factor lambda

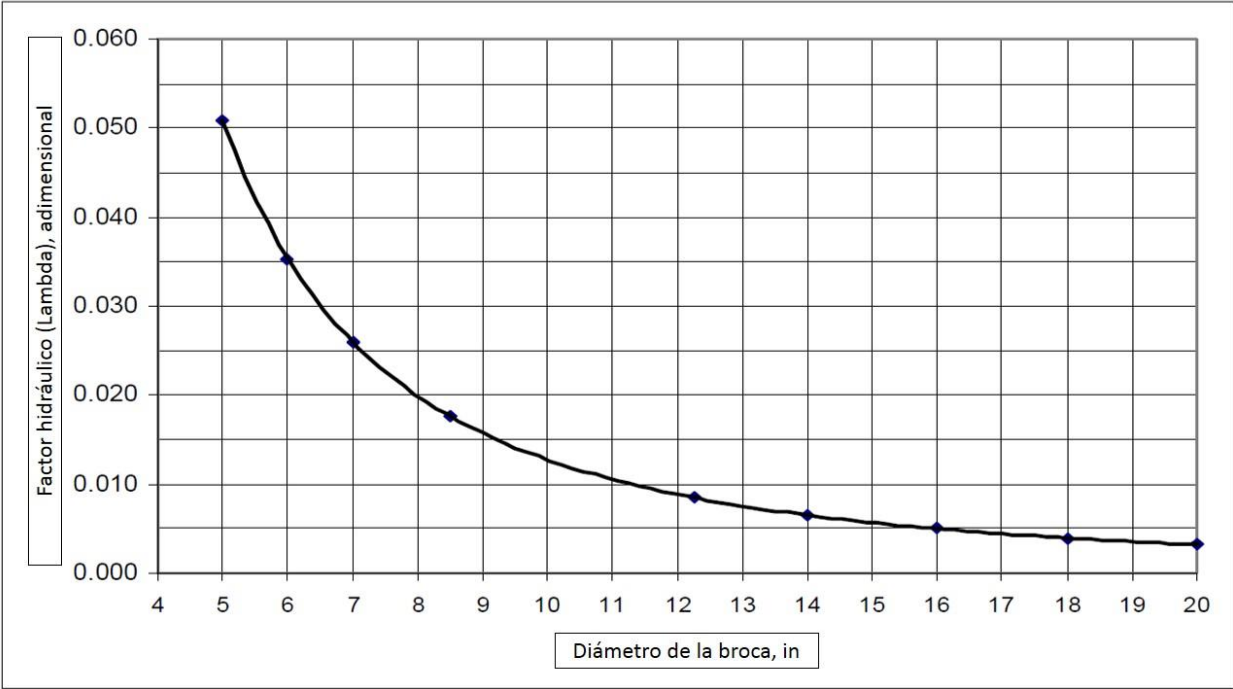


Figura 1. Cálculo del factor lambda tomado de: Armenta, M (2008). Identifying Inefficient Drilling Condition Using Drilling Specific Energy

2.4.2 Hydro mechanical specific energy (HMSE)

Si bien, la mayoría de la perforación se produce debido a la broca, es un hecho bien conocido de que la “incidencia en el impacto del chorro” produce cierta perforación causada por el fluido de perforación.

La energía requerida para remover un volumen unitario de roca viene primordialmente del torque aplicado, del peso sobre la broca (WOB), y de la fuerza ejercida por el fluido de perforación

sobre la formación. La hidráulica de la broca se tiene en cuenta para la eliminación de recortes de la formación por la “Erosión originada por el Jet”.

HMSE cuantifica la cantidad de energía requerida para perforar un volumen unitario de roca y removerla debajo de la broca. En unidades consistentes de psi, el HMSE se expresa de la siguiente forma:

$$HSME = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120 * \pi * RPM * T + 1154\eta\Delta P_b * Q}{A_B * ROP}$$

Donde:

HMSE = Hydro Mechanical Specific Energy (psi).

ΔP_b = Caída de presión a través de la broca (psi).

Q = Caudal (gal/min).

η = Factor dummy para la reducción de energía

WOB = lbf

A_B = Área de la broca (in^2)

WOB = Peso sobre la broca (lbf).

RPM = Números de vueltas en un minuto (Rev/min).

ROP = Velocidad de penetración (ft/hr).

T = Torque (lbs-ft).

2.4.2.1 Factor dummy

Solo entre el 25 y el 40 por ciento de la energía hidráulica disponible llega a la formación.

El arrastre de fluido acelerado hace que una pequeña fracción de energía llegue al fondo del pozo.

El factor Dummy expresa la reducción de energía hidráulica que se lleva a cabo, y se define como la relación de la velocidad del fluido que atraviesa la boquilla, impacta la formación y luego se encuentra alrededor de la broca y la distancia entre la boquilla y la formación. Dado que el flujo volumétrico a través de las boquillas es igual al flujo de lodo a través del anular, se pueden encontrar las velocidades (Vegar Berg & Saether Tveit, 2016). El factor Dummy se expresa de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{(1-A_v^{-k})}{M^2}$$

η = Factor dummy adimensional

Donde:

$$A_v = \frac{V_n}{V_f} = \frac{0,15*d_b^2}{n*d_n^2}$$

A_v = Relación entre velocidad a través de las boquillas y la velocidad en el espacio anular.

Adimensional

V_n = Velocidad del fluido a través de las boquillas (ft/s).

V_f = Velocidad fluido anular (ft/s).

d_b = Diámetro de la broca (in^2).

n = Número de boquillas

d_n = Diámetro de la boquilla (in).

$$M = \frac{d_n + 2LTan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d_n + sTan\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

M = Factor de pérdida de eficiencia adimensional

d_n = Diámetro de la boquilla (in).

s = Distancia de la boquilla al fondo (in).

L = Longitud del potencial núcleo (in).

θ = Angulo de la boquilla axialmente simétrico (grados).

2.5 Propiedades mecánicas de la roca relacionada con la perforación de pozos

2.5.1 Propiedades elásticas

Algunos materiales tienen la propiedad para resistir y recuperarse de las deformaciones producidas por fuerzas externas. Esta propiedad se la denomina elasticidad y es el fundamento inicial bajo el cual se estudia las propiedades mecánicas de las rocas.

Los principales índices que caracterizan el proceso de deformación de las rocas que poseen características elásticas son: el coeficiente que relaciona las tensiones normales (σ) con su correspondiente deformación (ϵ), el coeficiente de proporcionalidad entre las tensiones tangenciales (τ) y la deformación de desplazamiento (δ) y el denominado coeficiente de deformación transversal [E,G, μ].

Para un estado de deformaciones elásticas, por debajo del límite de elasticidad de la roca, E corresponde con el modelo de Elasticidad:

$$E = \frac{\sigma}{\delta}$$

Existen varios enfoques en el campo de la mecánica de roca para determinar las constantes elásticas; aquí se mencionan dos métodos:

- El primer método consiste en colocar una muestra de roca bajo una carga en una máquina de prueba mediante la cual se determinaran las constantes elásticas a partir de la relación de deformaciones, las constantes obtenidas del resultado de este método toman el nombre de constantes elásticas estáticas.

- El segundo método se refiere a las velocidades de las ondas acústicas y determina los valores a partir de la relación de la propagación de las ondas. Estas toman el nombre de constantes elásticas dinámicas.

Las constantes elásticas dinámicas son más altas que las estáticas, su diferencia es mayor a bajas presiones de confinamiento.

Una observación es que a bajas presiones de confinamiento las rocas tienden a una relación no lineal de esfuerzos de formación. A altas presiones de confinamiento el comportamiento es más lineal y existe más conexión entre el confinamiento de las rocas y el esfuerzo de estas.

2.5.2 Resistencia de la roca

2.5.2.1 Resistencia compresiva de la roca confinada (CCS)

El confinamiento por esfuerzos compresivos es la resistencia de la roca mientras está sujeta a presión en un medio confinado. Las rocas exhiben un efecto de fortalecimiento (llamado efecto de confinamiento), mientras están bajo presión. Generalmente, cuanto más profunda está la roca, mayor es el efecto. Se debe tener en cuenta que el efecto de confinamiento es la clave para la

determinación de la dureza de la roca in situ, para usar como indicador de la perforabilidad de una formación (T, 1994). El modelo CCS más utilizado se basa en el criterio de la resistencia lineal de la roca. Expresado de la siguiente manera:

$$\sigma_1 = Q + K\sigma_3$$

Donde:

K y Q son parámetros del material.

σ_1 = es el CCS.

σ_3 = estrés mínimo principal.

Sobre la base de este criterio, Caicedo propuso un modelo para calcular la resistencia de la roca en el fondo del fondo (Caicedo, Calhoun, & Ewy, 2005). Que se expresa de la siguiente forma:

$$\sigma_1 = UCS + (P_h - P_p) + 2(P_h - P_p) \sin\left(\frac{\varphi}{1 - \sin\varphi}\right)$$

Donde:

σ_1 = CCS (psi).

φ = Es el ángulo de fricción de la roca.

P_p = Presión de poro (psi).

P_h = Presión de la columna de lodo (psi).

2.5.2.2 Resistencia compresiva de la roca no confinada (UCS):

Son los esfuerzos compresivos de la roca no confinada. Es decir, la resistencia de la roca fuera del pozo, y este valor ignora la presión de sobrecarga y el efecto de endurecimiento de la roca que esta provoca. El UCS no tiene en cuenta la fuerza incremental creada en el pozo.

Algunos investigadores descubrieron que el rendimiento de la broca está fuertemente influenciado por el diferencial de presión que es definido como la diferencia entre la presión hidrostática y la presión del pozo. Después de realizar varias pruebas de laboratorio, ellos se cercioraron de que la resistencia de la roca incrementa la presión diferencial, y la ROP decrece cuando la presión hidrostática incrementa (Gamier & Van Lingen, 1959).

Un estudio de laboratorio llevado a cabo por Cunningham sobre la velocidad de perforación de una formación permeable, observó un fenómeno en el cual la velocidad de perforación decrece cuando la presión de la columna de lodo incrementa. Cunningham explicó que incrementar la presión de la columna de lodo conduce a un incremento en la resistencia de la roca (Cunningham & Eenink, 1959).

2.6 Efecto venturi

Consiste en un fenómeno de movimiento de un fluido dentro de un conducto cerrado que disminuye su presión al aumentar la velocidad después de pasar por un área con una contracción.

El efecto Venturi se explica por el principio de Bernoulli y el principio de continuidad de masa. Si el caudal de un fluido es constante pero la sección disminuye, necesariamente la velocidad aumenta tras atravesar esta sección. Por el teorema de la conservación de la energía mecánica, si la energía cinética aumenta, la energía determinada por el valor de la presión disminuye forzosamente. (Silva, 2012). Efectivamente, según el principio de Bernoulli:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2$$

Donde:

V = Velocidad del fluido en la sección considerada.

g = Aceleración gravitatoria, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.

P = Presión en cada punto de la línea de la corriente.

γ = Es el peso específico ($\gamma = \rho g$). Este valor se asume constante a lo largo del recorrido cuando se trata de un fluido incomprensible.

Z = Altura, en vertical, sobre una cota de referencia.

Subíndices 1 y 2 = indican los valores que se toman en un punto 1 y en otro punto 2, a lo largo de la conducción.

2.7 Formación

Es un conjunto de rocas caracterizadas por tener propiedades comunes. Es decir, son conjuntos heterogéneos de capas sedimentarias, que fueron depositadas en un mismo periodo y en un mismo lugar (Publications, December 2015).

2.7.1 Dureza de las formaciones

Es el término que se utiliza para describir la oposición de una formación al ser fracturada. La dureza está ligada a la solidez o cohesión de la roca y de los esfuerzos de compresión a los que se someta, esto dependerá de la litología. Las formaciones someras denominadas formaciones superiores sólo presentan la resistencia originada por la cohesión de la roca. Al aumentar la profundidad, se incluyen esfuerzos de compresión debido a la sobrecarga que generan las formaciones superiores. En consecuencia, se puede asegurar que las fracturas creadas en formaciones profundas son verticales. Una característica común de las rocas es que el incremento de la resistencia va acompañado de un incremento de presión. La resistencia de una roca está

subordinada a las presiones y tensiones circundantes. Cualquier presión o tensión añadida sobre el material rocoso lo hará más fuerte. El grado de porosidad y permeabilidad de las rocas son relevantes para poder establecer el grado de dureza. Formaciones muy porosas son blandas y más fáciles de perforar en contraposición de las formaciones con bajo nivel de porosidad. (LOPEZ, 2009)

Según su dureza las formaciones se pueden denominar de la siguiente manera:

Suaves y medianamente duras: Lutitas, Calizas, Areniscas.

Medianamente duras y duras: Calizas duras, Areniscas duras, Dolomitas.

Duras y abrasivas: Granitos, Basaltos, Cherts, Calizas silíceas. (LOPEZ, 2009).

2.8 Formacion mirador

La formación Mirador pertenece a la cuenca de los Llanos Orientales en Colombia. Es la principal formación productora del piedemonte llanero. Se encuentra entre la formación Carbonera y la formación Cuervos. La formación Mirador contiene un conjunto de areniscas masivas de grano grueso a fino, compuesta en su mayoría de cuarzo (95%), lo cual la hace muy abrasiva. También hay presencia de feldespatos y materia orgánica leñosa pero en menor grado. En esta formación la porosidad promedio es de 8% y posee una alta permeabilidad. Las arenas contenidas en la formación Mirador tienen altas resistencias de compresión, del orden de 20000 Psi y mayores, convirtiéndola en una formación difícil de perforar. (Smith , Browne, Heinz, Wise, & Baker Hughes, 1996).

2.8 Campo floreña

El descubrimiento de este campo se logró gracias a la perforación de un pozo de avanzada que pretendía delimitar la extensión del campo Volcanera, localizado al suroeste. Sin embargo se logró comprobar que éste correspondía a un nuevo descubrimiento y por tanto el tamaño de Volcanera no era tan extenso como se especuló en un principio. En 1998, se comprobó la comercialidad de los hidrocarburos presentes en las formaciones Barco y Guadalupe, dando inicio a la vida productiva del campo.

2.8.1 Ubicación geografica

El campo se encuentra ubicado al norte de la ciudad de Yopal, capital del departamento de Casanare, tiene aproximadamente 10 km de largo por 3 km de ancho en dirección suroeste – noreste.

3 Método para analizar la relación entre las altas velocidades en la salida del fluido y la ROP en formaciones duras

Para comprobar cómo influyen las altas velocidades en la salida del fluido a través de las boquillas sobre la ROP en formaciones duras, se debe tener en cuenta ciertos factores:

- La velocidad de salida del fluido aumenta por dos razones:
 - ✓ Disminuye el área de las boquillas.
 - ✓ Cuando aumenta el caudal que se está bombeando desde superficie.
- Si se va a trabajar con formaciones duras presentes en Colombia se debe analizar formaciones como lo es la formación Mirador en la que las arenas contenidas poseen resistencia de compresión que van del orden de los 20000 psi.
- Se deben analizar corridas de brocas (PDC, impregnadas y triconicas) y discriminar una sección perforada en la que el tipo de roca sedimentario sea homogéneo en este caso arenisca que presenta una alta dureza, para que los resultados sean confiables.
- La información de los parámetros de las corridas debe reportarse pie a pie. Ya que dará un alto grado de confiabilidad debido a que cuando no es así, la información puede proceder de la cabina de *mud logging* o estar incompleta, y no presenta el rendimiento real que tuvo la broca durante la perforación.

Para comprobar cómo influyen las altas velocidades en la salida del fluido a través de las boquillas sobre la erosión de las paredes de pozo se hará el cálculo de la tasa de corte de las boquillas y se observara si en algún punto esta sobrepasa los $100,000 \text{ sec}^{-1}$ que es cuando se generan volúmenes considerables provenientes de la erosión

3.1 Criterios para el estudio del efecto de las altas velocidades en la salida del fluido en formaciones duras

Basados en los métodos para analizar la relación entre las altas velocidades en la salida del fluido y la ROP en formaciones duras expuestos con anterioridad.

En la tabla 1 se presenta los criterios que se deben tener en cuenta al momento de analizar el efecto de las altas velocidades en la salida del fluido en formaciones duras en cualquier campo

Tabla 1

Criterios para el estudio de las altas velocidades en la salida del fluido en formaciones duras

Criterio	Especificación	Justificación
1. Caudal	Variable	Debido a que se necesita secciones perforadas en donde hayan altos caudales y por ende, alta velocidades en la salida del fluido para poder analizar el comportamiento de la ROP y de los otros parámetros, en contraste con las secciones con caudales menores. Se recomienda una diferencia entre el caudal máximo y mínimo utilizados en la corrida de almenos 100 gal/min

<p>2. Datos de los parámetros analizados</p>	<p>Debe estar reportada pie a pie</p>	<p>Para aumentar el grado de confiabilidad de la información analizada</p>
		<p>Debido a que la broca presenta diferentes desempeños dependiendo el tipo de broca perforada. Esto, permite aumentar el grado de</p>
<p>3. Sección analizada de la corrida</p>	<p>Homogénea; Es decir, de un solo tipo de roca</p>	<p>confiabilidad de los resultados. Se debe analizar secciones perforadas de la corrida en donde esté presente un tipo roca dura como lo son areniscas.</p>
<p>4. Sección analizada de la corrida</p>	<p>No debe presentar problemas operacionales</p>	<p>Debido a que si presenta problemas operacionales no serán confiable los resultados en los que se muestra el desempeño de la perforación, en la sección analizada.</p>

4. Casos de estudio de corridas de brocas perforadas en la formación mirador en Colombia

Teniendo en cuenta los métodos y los criterios expuestos con anterioridad para analizar cómo influye las altas velocidades en la salida del fluido en la ROP.

A continuación se presenta dos corridas de broca que fueron hechas en diferentes pozos en el campo floreña, en la formación mirador en Colombia.

4.1 Parámetros observados

En cada una de las corridas de las brocas de los dos casos estudiados se registraron los siguientes parámetros:

- Caudal vs Profundidad (Datos tomados de la corrida)
- Velocidad a través de la boquilla vs Profundidad
- Para calcular la velocidad del fluido a través de las boquillas se utilizó la siguiente fórmula:

$$V_n = \frac{418.3 \times Q}{\sum dj^2}$$

- MSE vs Profundidad
- Para calcular el MSE hicimos uso de la siguiente fórmula:

$$MSE = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120 * \pi * RPM * T}{A_B * ROP}$$

- ROP vs Profundidad (datos tomados de corrida)
- DSE vs Profundidad
- Fórmula utilizada para calcular el DSE:

$$DSE = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120 * \pi * RPM * T}{A_B * ROP} - \frac{1,980,000 * \lambda * HP_B}{ROP * A_B}$$

- Torque vs Profundidad (datos tomados de la corrida)
- RPM vs Profundidad (datos tomados de la corrida)
- WOB vs Profundidad (datos tomados de la corrida)
- Fuerza de impacto (FJ) vs profundidad

Fórmula utilizada para calcular FJ:

$$FJ = 0,000516P_m QV_n$$

- Tasa de Corte de las boquillas vs Profundidad

4.2 Corridas de brocas estudiadas

En la Tabla 2 se presenta las características de los casos estudiados, de las corridas de las brocas hechas en el campo floreña, en la formación mirador en diferentes pozos.

Tabla 2
Información de las corridas.

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	POZO 1	POZO 2
		CORRIDA A	CORRIDA B
Tipo de broca	---	Impregnada	PDC
Área de flujo de las boquillas	in^2	1,5	0,726
Área de la broca	in^2	8,5	10,625
Profundidades	Ft	14.921 – 15.041	11.173 – 12.936
Caudales	gal/min	497,7 – 633,8	559 - 756
Densidad de Lodo	ppg	8,4	8,4
Potencia en la Broca	hp	33,566	197,31

JSA	in^2	---	14,5
Formación	---	Mirador compuesta principalmente de arenisca con pequeñas trazas de lutitas	Mirador compuesta principalmente de un 90% de arenisca y un 10% de lutitas
Tipo de roca estudiada	---	Arenisca	Arenisca

5 Resultados y análisis

- Desde las figura 2 hasta la figura 17, se presenta las gráficas de los parámetros descritos anteriormente para cada una de las corridas, en las cuales, se destacará la sección con mayor galonaje y se hará especial énfasis en este, debido a que en esta sección es en donde se producen las mayores velocidades del fluido a través de las boquillas de la broca.

5.1 Corrida A – pozo 1 (broca impregnada)

Los datos con los que se construyeron las siguientes graficas (figura 2 hasta figura 9) pueden ser visualizados en el Apéndice A, en la base de datos de la biblioteca UIS

5.1.1 Caudal vs profundidad

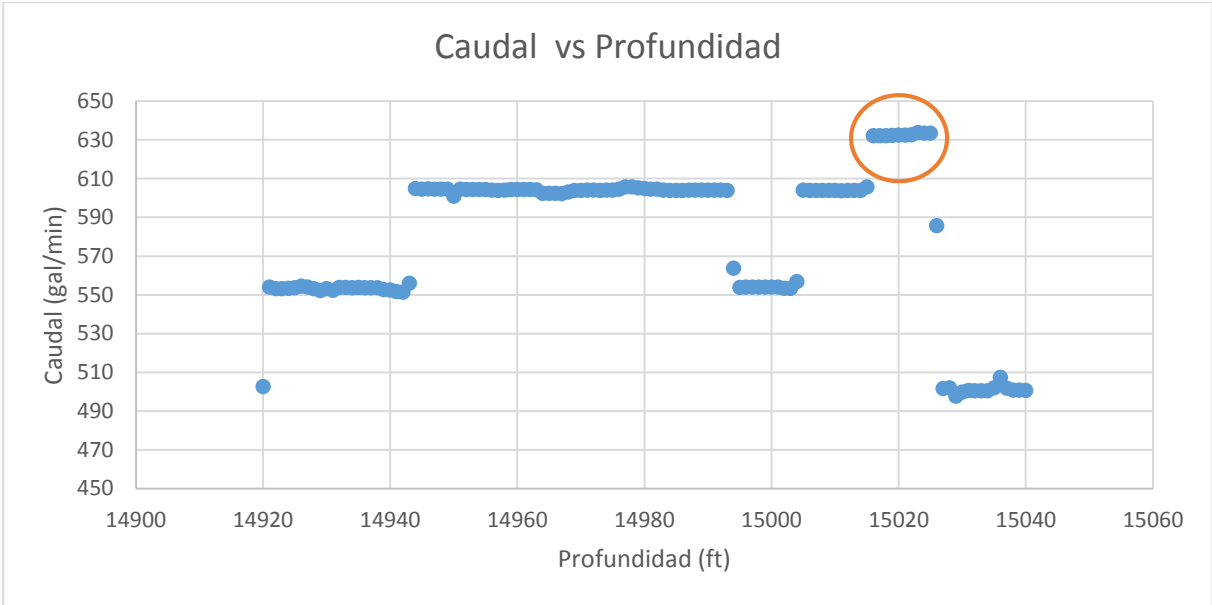


Figura 2. Caudal vs profundidad. Corrida A. pozo 1. Broca impregnada

En la figura 2 se puede observar una sección resaltada en donde se comprenden los valores más altos de flujo durante la corrida. Esta sección se encuentra entre las profundidades de 15016 ft y 15025 ft en los cuales los valores de flujo aumentan alrededor de un 5 % con respecto a los valores anteriores. Es decir, los valores de los caudales pasan de alrededor de 605 gal/min a 632 gal/min. Esta sección es de vital importancia para el estudio de los otros parámetros.

5.1.2 Velocidad a través de las boquillas vs profundidad

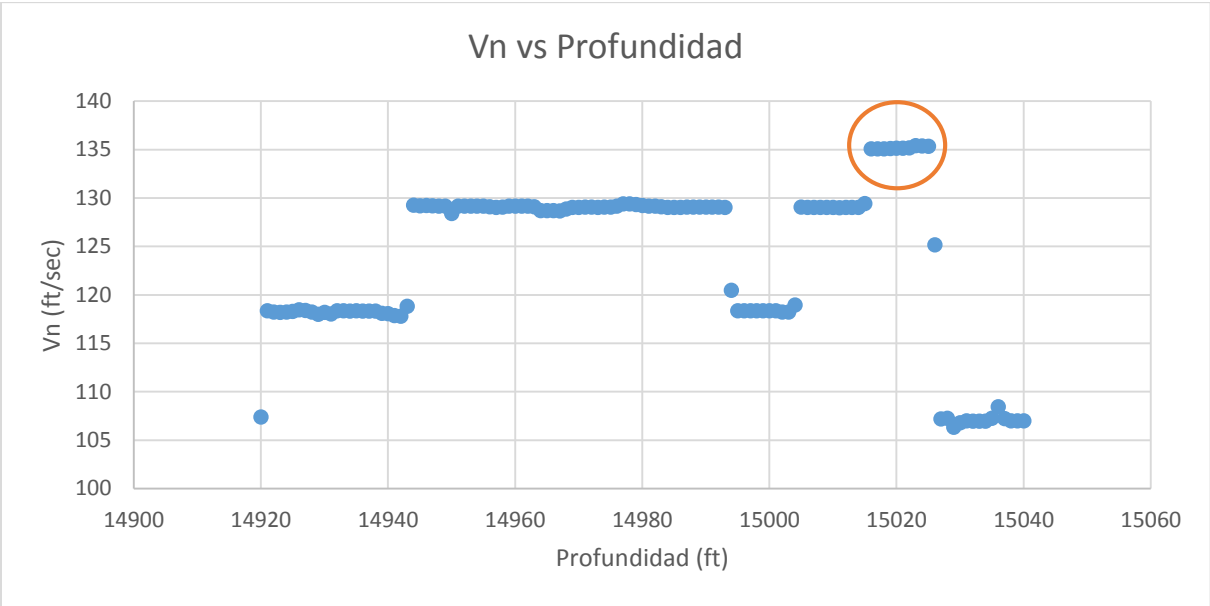


Figura 3. Velocidad a través de la boquilla vs Profundidad. Corrida A. Pozo 1. Broca Impregnada

En la figura 3 se puede observar que en esta sección en donde el caudal aumenta, también aumenta la velocidad del fluido a través de las boquillas, ya que son directamente proporcionales. Podemos observar además que la velocidad del fluido a través de las boquillas también aumenta un 5 % pasando de valores de alrededor de 129 ft/sec a 135 ft/sec.

5.1.3 MSE vs profundidad

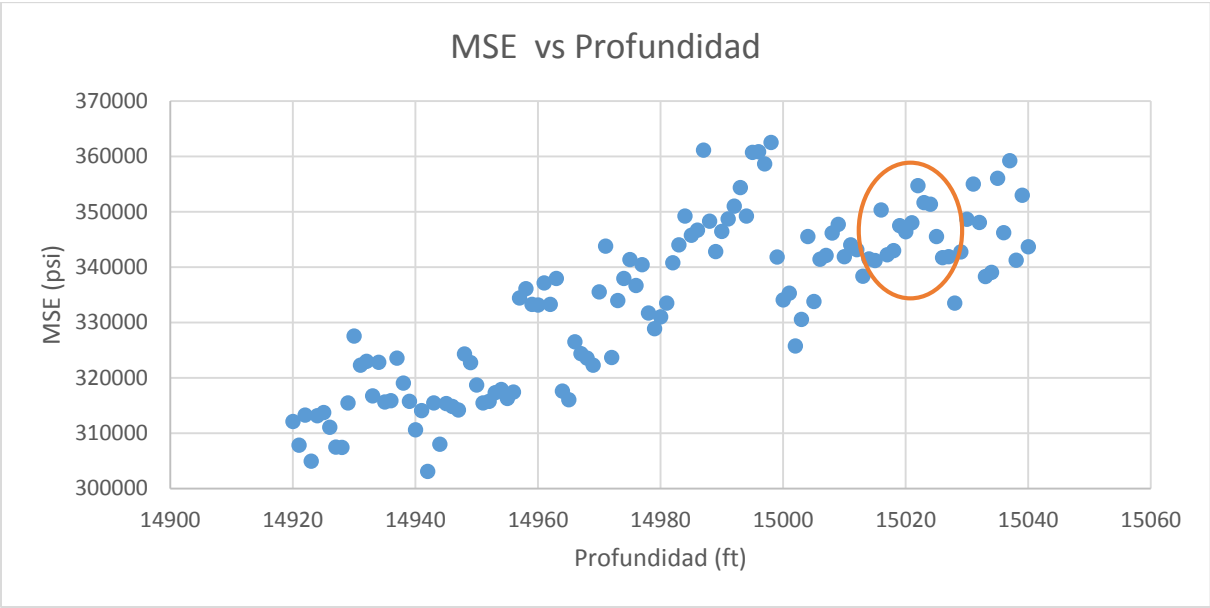


Figura 4. MSE vs Profundidad. Corrida A. Pozo 1. Broca Impregnada

En la figura 4 se puede observar que en esta sección es en donde se presentan las altas velocidades del fluido a través de las boquillas, también así en le cara de la broca. El MSE posee valores altos y con tendencia a aumentar, lo que indica que desde el punto de vista mecánico (torsional y axial) basándonos en el concepto del MSE, la broca tiende o está perforando ineficientemente.

5.1.4 ROP vs profundidad

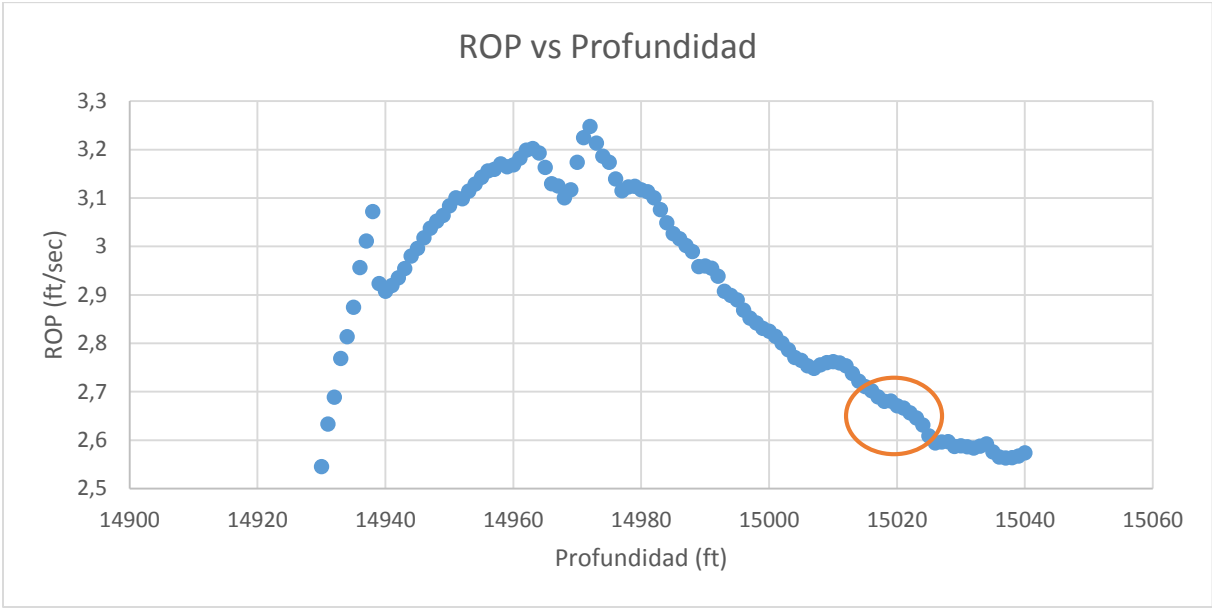


Figura 5. ROP vs Profundidad. Corrida A. Pozo 1. Broca Impregnada

En la figura 5 se puede observar que en la sección donde las velocidades del fluido a través de las boquillas aumentan, el MSE nos indica que la broca no está trabajando eficientemente y la velocidad de penetración (ROP) aunque venia disminuyendo a profundidades anteriores a la estudiada, no muestra alguna mejora en el desempeño de la broca.

5.1.5 DSE vs profundidad

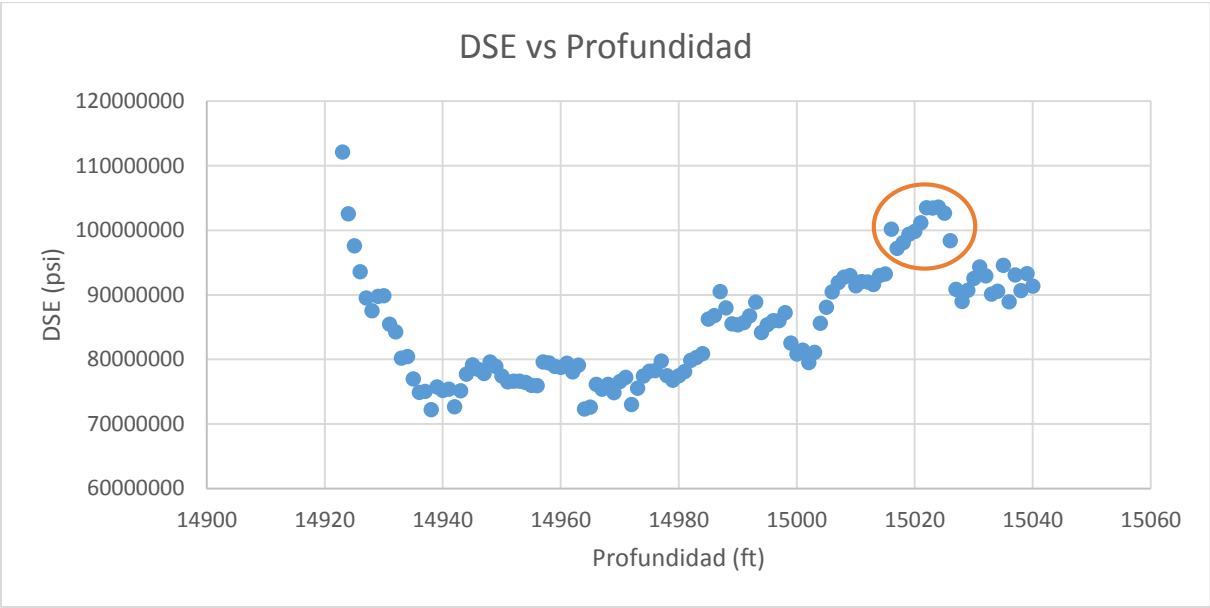


Figura 6. DSE vs Profundidad. Corrida A. Pozo 1. Broca Impregnada

En la figura 6 se puede observar que a estas profundidades el DSE, que es un parámetro que estudia el comportamiento tanto como mecánico como hidráulico del sistema, indica que la broca está perforando ineficientemente. Es así, que presenta valores altos inmediatamente después de esta sección cuando se reduce el caudal. En consecuencia, en las velocidades a través de la boquilla se nota una mejora en la eficiencia de la broca debido a que se observa que los valores de DSE disminuyen.

5.1.6 Fuerza de Impacto (FJ) vs profundidad

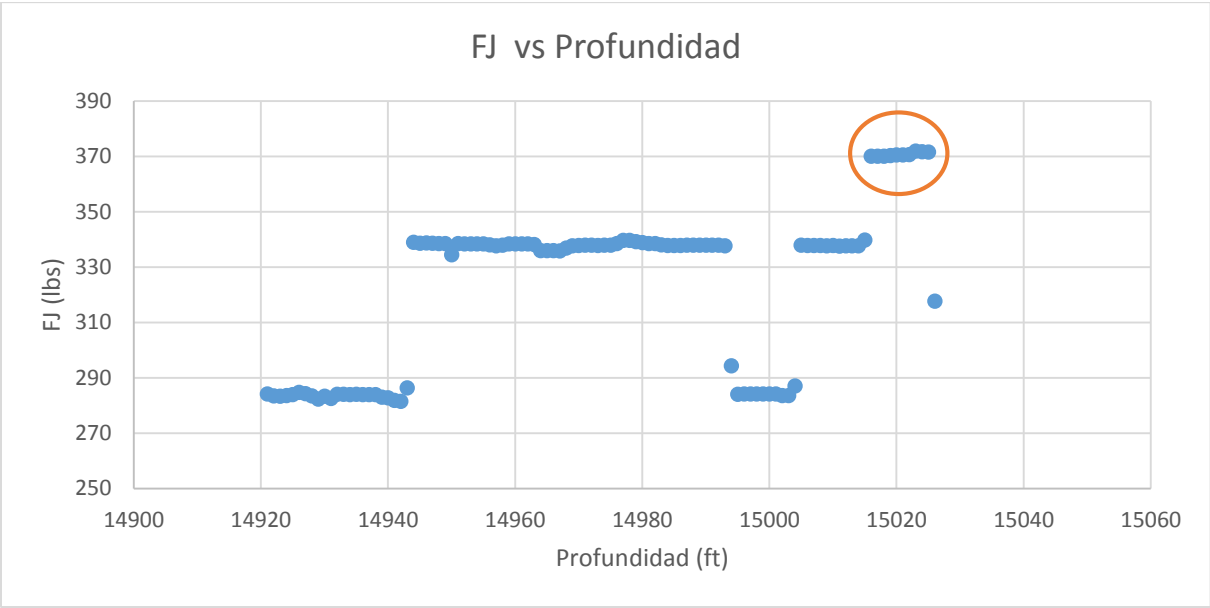


Figura 7. FJ vs Profundidad. Corrida A. Pozo 1. Broca Impregnada.

En la figura 7 se puede observar que en la sección la fuerza de impacto que es directamente proporcional al Pump off force aumenta alrededor de un 9% pasando de valores de alrededor 337 lbs a 370 lbs. Este resultado no corrobora lo que se esperaba, que disminuyera el peso sobre la broca (WOB).

5.1.7 WOB vs profundidad

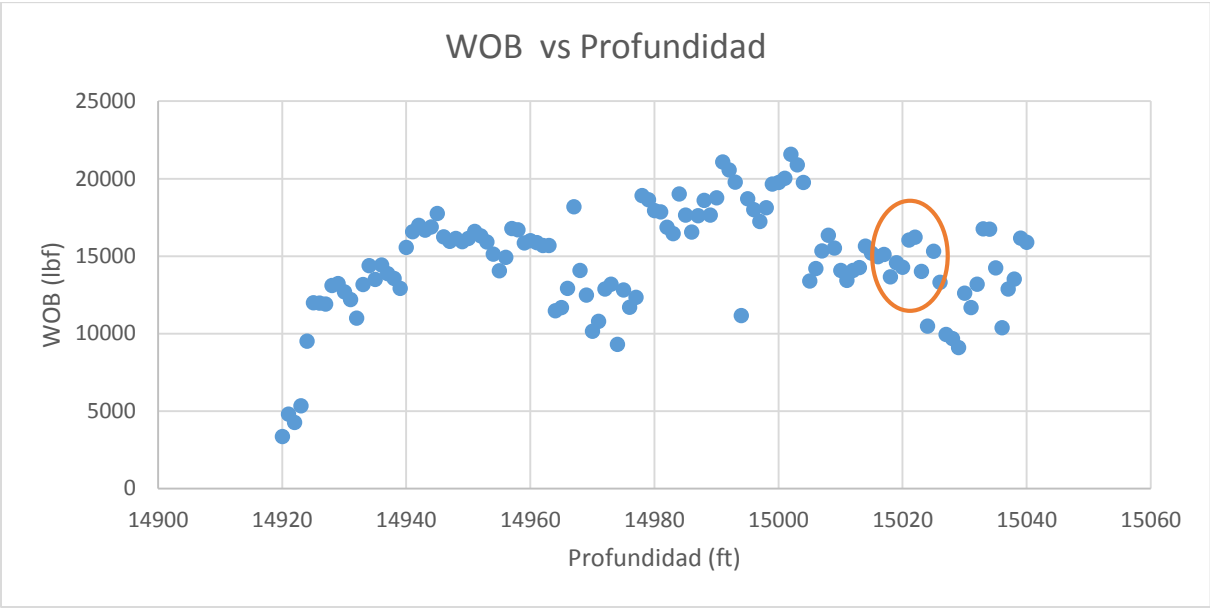


Figura 8. WOB vs Profundidad. Corrida A. Pozo 1. Broca Impregnada.

En la figura 8 se puede observar que aunque está ocurriendo el Pump off force en esta sección de la corrida, no se nota una disminución del WOB comparándolo con los valores inmediatamente anteriores. La no disminución del peso se debe a que a estas profundidades se tiene un gran peso sobre la broca (WOB) alrededor de las 15000 lbs por lo tanto este Pump off force o ese colchón que se genera no afecta el WOB.

5.1.8 Tasa de Corte de las boquillas vs profundidad

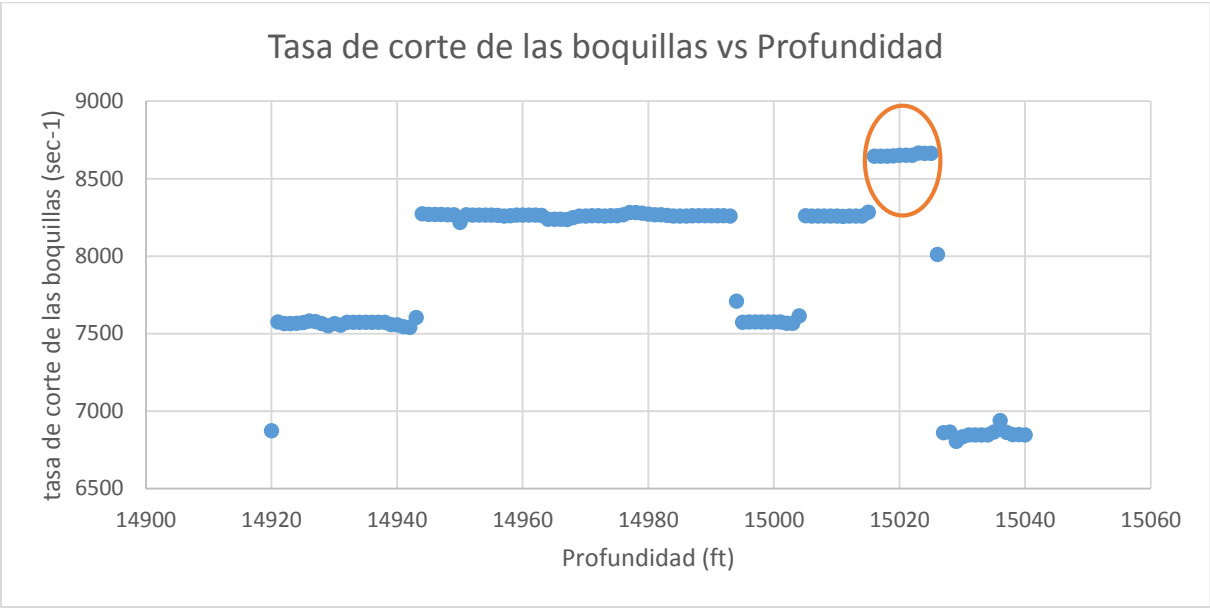


Figura 9 Tasa de corte de las boquillas vs Profundidad. Corrida A. Pozo 1. Broca Impregnada

En la figura 9 se puede observar que en ningún momento las tasas de cortes de las boquillas exceden los 100,000 sec-1 ni siquiera en la sección estudiada de las altas velocidades en la salida del fluido a través de las boquillas, cuando se sobrepasa este valor es donde se generan volúmenes considerables de erosión. Por lo tanto, las altas velocidades en la salida del fluido a través de las boquillas en formaciones duras no generan erosión en las paredes del pozo utilizando brocas Impregnadas.

5.2 Corrida B – pozo 2 (broca PDC)

Los datos con los que se construyeron las siguientes graficas (figura 10 hasta figura 17) pueden ser visualizados en el Apéndice B, en la base de datos de la biblioteca UIS

5.2.1 Caudal vs profundidad

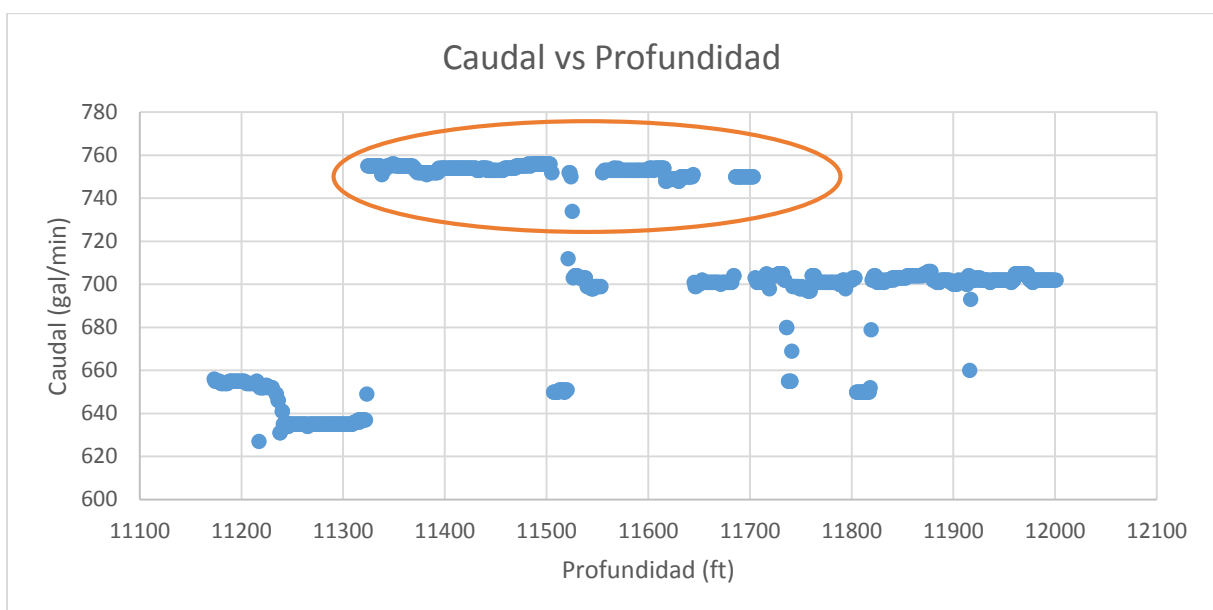


Figura 10. Caudal vs Profundidad. Corrida B. Pozo 2. Broca PDC

En la figura 10 se puede observar que al igual que el análisis realizado en la corrida A para brocas impregnadas, en la figura 9 podemos observar una sección resaltada en donde se comprende los valores más altos de flujo durante la corrida. Esta sección se encuentra entre las profundidades de 11324 ft y 11505 ft en las cuales los valores de los caudales suben alrededor de un 15 % con respecto a los valores anteriores. Es decir, los valores de los caudales pasan de alrededor de 649 gal/min a 755 gal/min. Esta sección es de vital importancia para el estudio de los otros parámetros.

5.2.2 Velocidad a través de las boquillas vs profundidad

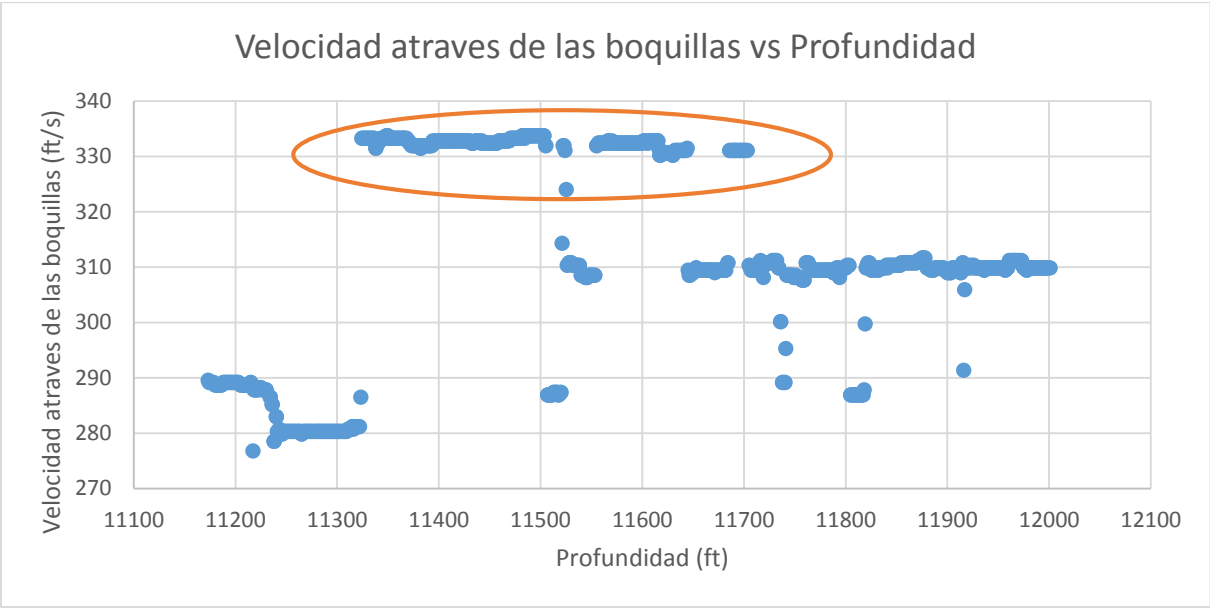


Figura 11. Velocidad a través de las boquillas vs Profundidad. Corrida B. Pozo 2. Broca PDC.

En la figura 11 se puede observar que en esta sección en donde el caudal aumenta, también aumenta la velocidad del fluido a través de las boquillas, ya que son directamente proporcionales. Podemos observar además que la velocidad del fluido a través de las boquillas aumenta también un 15 % pasando de valores de alrededor de 286 ft/sec a 333 ft/sec.

5.2.3 MSE vs profundidad

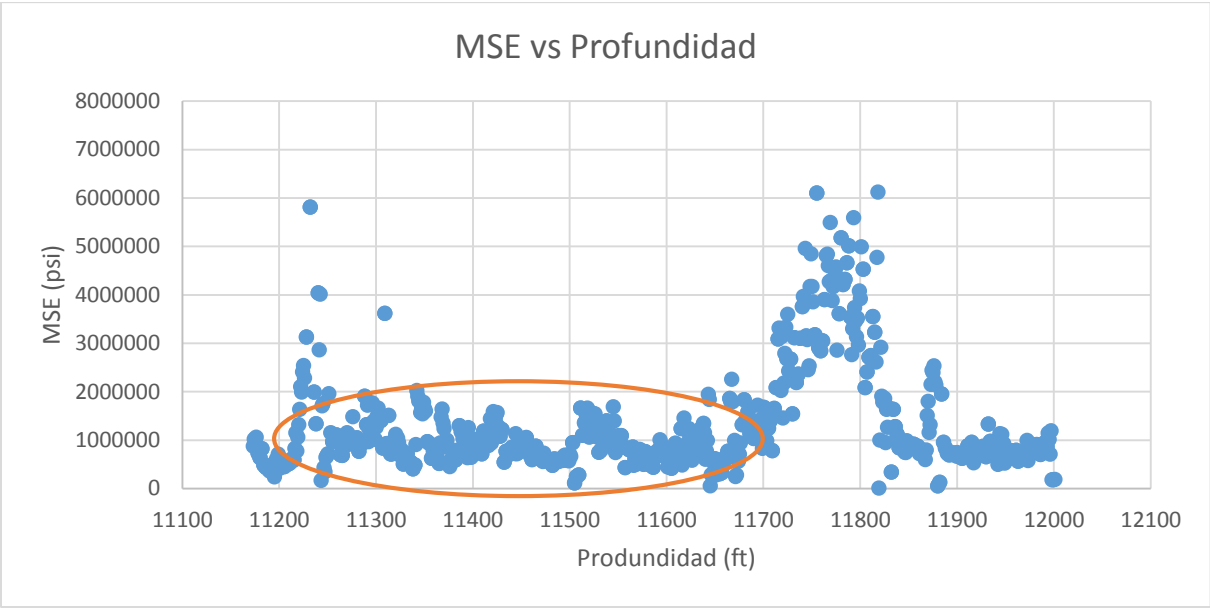


Figura 12. MSE vs Profundidad. Corrida B. Pozo 2. Broca PDC.

En la figura 12 se puede observar que en esta sección en donde se presentan las altas velocidades del fluido a través de las boquillas y por tanto en le cara de la broca, el MSE se mantiene constante y con valores bajos lo que indica que desde el punto de vista mecánico (torsional y axial) basándonos en el concepto del MSE, la broca tiende o está perforando eficientemente

4.2.4 ROP vs profundidad

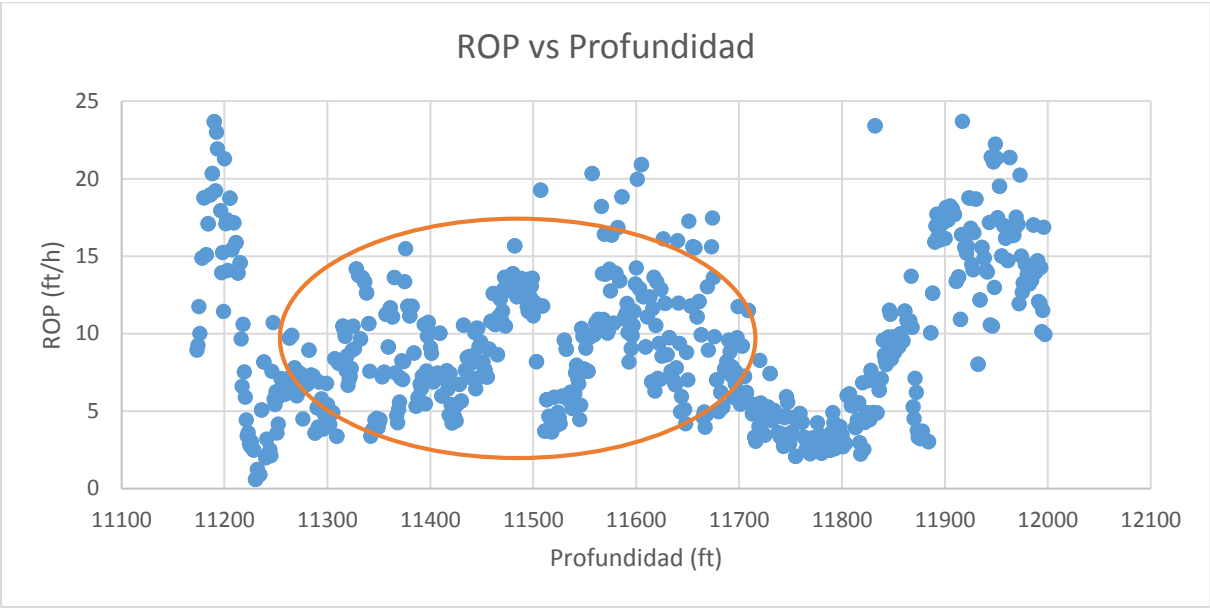


Figura 13. ROP vs Profundidad. Corrida B. Pozo 2. Broca PDC.

En la figura 13 Se puede observar que en la sección donde las velocidades del fluido a través de las boquillas aumentan, el MSE nos indica que la broca está trabajando eficientemente. Pero a pesar de esto, la velocidad de penetración (ROP) se mantiene en un rango de alrededor 5 ft/h y 15 ft/h y no aumenta e incluso disminuye en pequeños lapsos dentro de esta área observada.

5.2.5 DSE vs profundidad

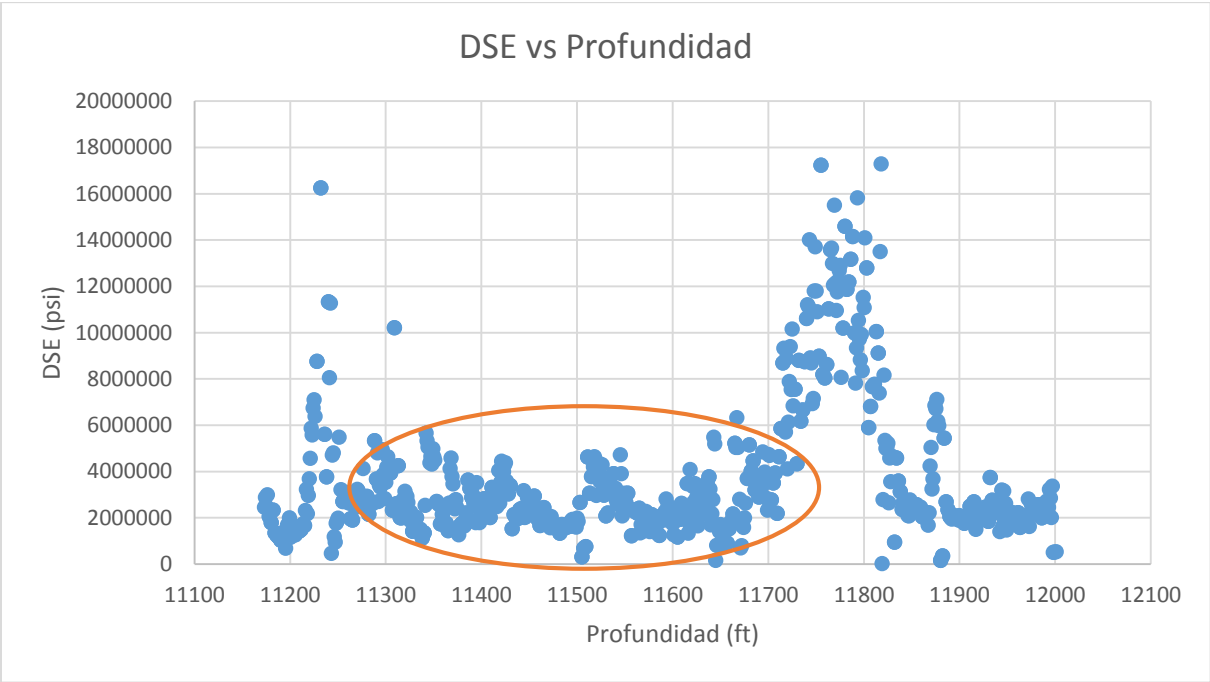


Figura 14. DSE vs Profundidad. Corrida B. Pozo 2. Broca PDC.

En la figura 14 se puede observar que a estas profundidades el DSE que es un parámetro que estudia el comportamiento tanto mecánico (axial y torsional), como el hidráulico del sistema, indica que, desde esos dos puntos de vista, la broca está perforando eficientemente en la sección donde las velocidades de los fluidos a través de las boquillas y en la cara la broca son altas.

5.2.6 Fuerza de impacto (FJ) vs profundidad

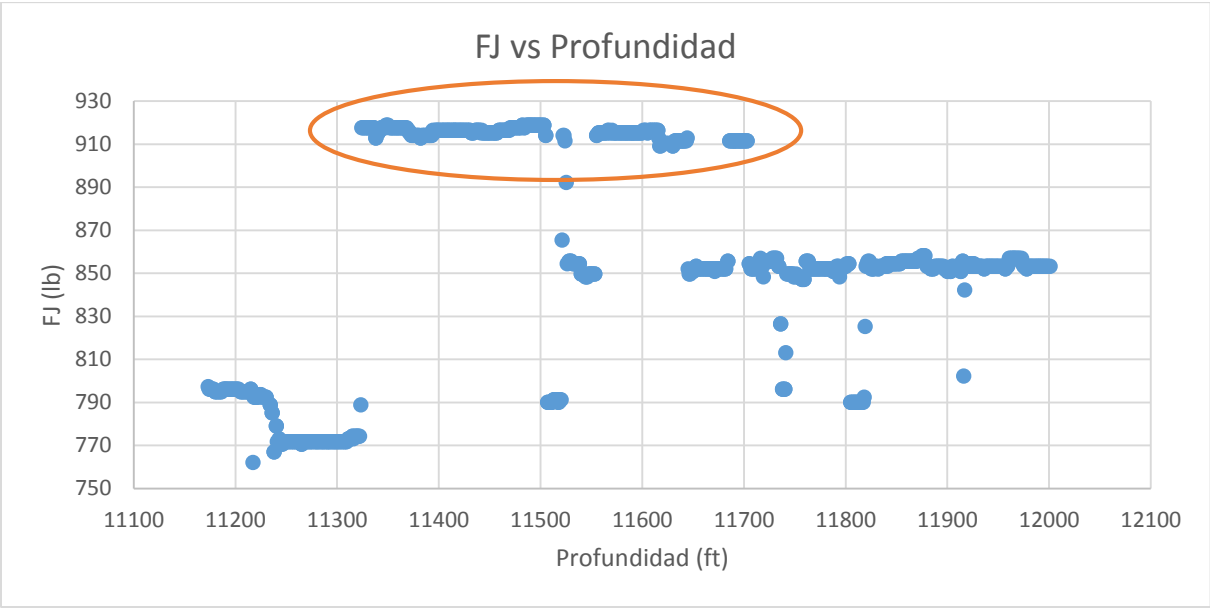


Figura 15. FJ vs Profundidad. Corrida B. Pozo 2. Broca PDC.

En la figura 15 se puede observar que en la sección la fuerza de impacto que es directamente proporcional al Pump off force aumenta alrededor en un 15% pasando de valores de alrededor 788 lbs a 917 lbs. Este resultado no corrobora lo que se esperaba, que disminuyera el peso sobre la broca (WOB) en esta sección perforada donde las velocidades del fluido son altas.

5.2.7 WOB vs profundidad

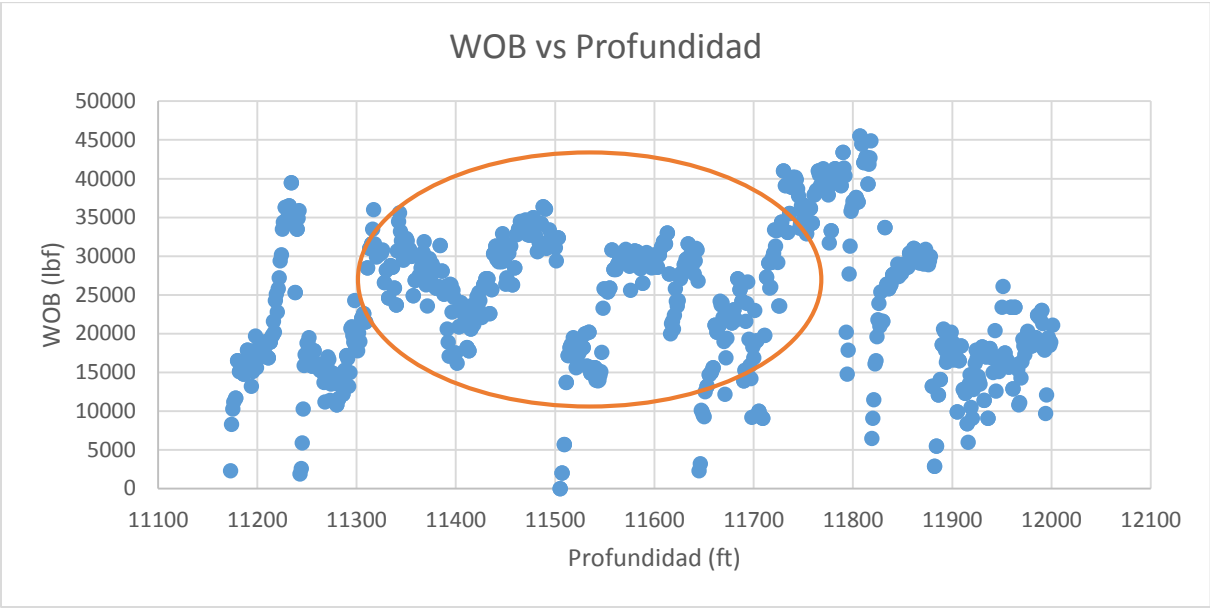


Figura 16. WOB vs Profundidad. Corrida B. Pozo 2. Broca PDC

En la figura 16 se puede observar que aunque el peso sobre la broca (WOB) no tiene un patrón de tendencia claro, se esperaba que el aumento de la fuerza de impacto (Pump off force) llevara a una disminución sostenida del WOB en esta sección donde las velocidades del fluido que pasa a través de las boquillas son altas, gráficamente podemos detallar que en pequeños lapsos de sección perforada los valores del WOB disminuyen, pero en la mayor parte de la sección estudiada estos valores se mantienen en un rango de 25000 lb y 35000. Es decir, el Pump off force no está afectando el WOB.

5.2.8 Tasa de cortes de las boquillas vs profundidad

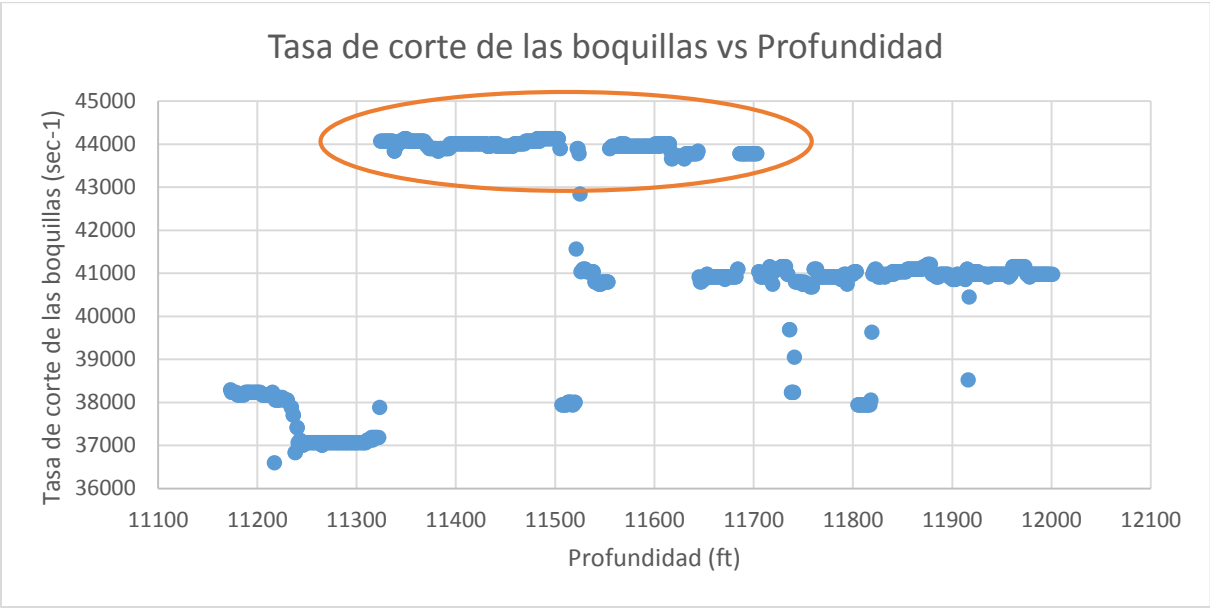


Figura 17 Tasa de corte de las boquillas vs Profundidad. Corrida B. Pozo 2. Broca PDC

En la figura 17 se puede observar que en ningún momento las tasas de cortes de las boquillas exceden los 100,000 sec-1 ni siquiera en la sección estudiada de las altas velocidades en la salida del fluido a través de las boquillas, cuando se sobrepasa este valor es donde se generan volúmenes considerables de erosión. Por lo tanto, las altas velocidades en la salida del fluido a través de las boquillas en formaciones duras no generan erosión en las paredes del pozo utilizando brocas PDC.

6 Conclusiones

- En este trabajo se puede evidenciar como las altas velocidades del fluido a través de las boquillas y así en la cara de broca no contribuyen a una mejora en la ROP tanto en el desempeño en brocas Impregnadas como en el desempeño en brocas PDC debido a que en las secciones perforadas donde las velocidades del fluido en la cara de la broca eran altas, la ROP no presentó un comportamiento favorable.
- Es importante señalar que el efecto de las altas velocidades del fluido genera un aumento en la fuerza de impacto, la cual es directamente proporcional al Pump off force pero no disminuye el peso sobre la broca (WOB) como se esperaba. Debido a que a estas profundidades en una formación dura como lo es la del Mirador se requiere aplicar alto peso sobre la broca, lo que hace que el colchón de agua que genera el Pump off force sobre la cara de la broca no afecte sustancialmente la WOB.
- Las altas velocidades en la salida del fluido no generan volúmenes considerables de erosión en el pozo. Ya que, como pudimos observar las tasas de corte de las boquillas no superan los 100,000 sec^{-1} que a partir de este valor es cuando se inicia a obtener volúmenes considerables de erosión en el pozo.
- Se puede apreciar que la broca impregnada es más sensible al cambio de los valores de las velocidades de los fluidos durante la perforación. Se puede apreciar también que el DSE (que representa el comportamiento hidráulico y el mecánico) inmediatamente se reduce a la velocidad del fluido que también se disminuye en contraste con lo que sucede con el MSE que sigue aumentando. En La broca PDC el

DSE y MSE tuvieron comportamientos similares, esto, debido a que el área de flujo del fluido a través de la broca o Junk Slot Area (JSA) es mayor en las brocas PDC.

- Se evidencia que el efecto Venturi no es aplicable durante la perforación en formaciones duras. Debido a que, como se observa en las altas velocidades de los fluidos de perforación, no presentan un buen desempeño, y a causa de esto, la reducción de presión que se efectúa en la cara de la broca al aumentar la velocidad del fluido que pasa a través de las boquillas. Esto no genera una disminución de la presión de confinamiento y/o se ve afectado por factores externos a esto, como el Pump off force, que aumenta en esta sección estudiada.

7 Recomendaciones

Se recomienda hacer un estudio del HMSE que además de tener en cuenta los factores mecánicos durante la perforación, también la hidráulica teniendo en cuenta la geometría de la broca y la reducción de la potencia hidráulica. Si este factor resulta viable, podría conllevar a la creación de un software que reemplace el uso del MSE por el uso del HMSE en todos los campos de Colombia, especialmente los campos donde se perfora en formaciones duras.

Se recomienda hacer una investigación que conlleve al cálculo del factor dummy, el cual es un factor que depende de la geometría de cada una de las brocas y nos brinda información acerca de la pérdida de energía hidráulica que se está presentando durante la perforación.

Se recomienda hacer un estudio de la caída de presión que se genera en las boquillas, ya que, durante la investigación se observó que algunos motores utilizados durante la perforación son sensibles a esta caída de presión en las boquillas; Las cuales, dependen del tipo y la geometría de las mismas.

Referencias

- Armenta, M. (2008). Identifying Inefficient Drilling Conditions Using Drilling Specific Energy. *SPE*, 16.
- Caicedo, H., Calhoun, W., & Ewy, R. (2005). *Unique ROP predictor using bit-specific coefficient of sliding friction and mechanical efficiency as a function of confined compressive strength impacts drilling performance*. Amsterdam.
- Chemerinski, B., Oil resources, I., & Robinson, L. (1995). *Hydraulic Wellbore Erosion While Drilling*.
- Cunningham, R., & Eenink, J. (1959). *Laboratory study of effect of overburden formation and mud column pressures on drilling rate of permeable formation*.
- Gamier, A., & Van Lingen, N. (1959). *Phenomena affecting drilling rates at depth Paper SPE 1094 g*.
- Gomez, I. (2016). *Daño a las barrenas, su aplicación en la perforación y soluciones propuestas (Tesis de Grado)*. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/10401/Tesis.pdf?sequence=1>
- Hedge, C., Daigle, H., Millwater, H., Gray, K., & The University of Texas. (2017). *Analysis of Rate of Penetration (ROP). Prediction in Drilling Using Physics-based and Data-driven Models*.
- Heydarshahy, S., Karekal, S., & Petroleum Exploration and Development. (2017). *Influences of Bit profiles On possible fracture Modes*.

LOPEZ, N. (2009). *Obtencion de muestras representativas de las rocas de yacimientos petroleros.*

Obtenido de

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/1107?show=full>

Publications, I. T. (December 2015). *Baker Hughes INTEQ Drilling Engineering.*

Silva, M. (2012). Eficiencia en el consumo de agua de uso residencial. *Revista de Ingenieria*

Universidad de Medellin. Obtenido de

<https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/595/536>

Smith , P., Browne, s., Heinz, T., Wise, W., & Baker Hughes. (1996). *Drilling fluid design to prevent formation damage in high permeability quartz arenite sandstones.* Society of Petroleum engineers, Denver, colorado. Obtenido de <https://doi.org/10.2118/36430-MS>

T, R. F. (05 de mayo de 1994). *OIL&GAS JOURNAL.* Obtenido de <https://www.ogj.com/articles/print/volume-92/issue-20/in-this-issue/drilling/confined-compressive-strength-analysis-can-improve-pdc-bit-selection.html>

Teale, R. (1965). *The concept of specific Energy in Rock drilling.*

Vegar Berg, P., & Saether Tveit, O. (2016). *Model for evaluating drilling efficiency based on the concept of Mechanical Specific Energy.*

