

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

Evaluación De Los Parámetros De Limpieza Del Pozo Y Su Impacto En La Velocidad De Perforación

Julián Ricardo Clavijo Martínez

**Universidad Industrial De Santander
Facultad De Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela De Ingeniería De Petróleos
Bucaramanga
2022**

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

Evaluación De Los Parámetros De Limpieza Del Pozo Y Su Impacto En La Velocidad De Perforación

Julián Ricardo Clavijo Martínez

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero de Petróleos

Director:

Emiliano Ariza León

PH.D. en Ingeniería Química

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela De Ingeniería De Petróleos

Bucaramanga

2022

DEDICATORIA

*A Dios por ser mi guía y estar siempre conmigo en cada paso de mi vida.
Toda la gloria sea para Él porque de su mano todo esto se hizo
realidad.*

*A mi Familia, que fue mi más grande motivación para sacar mi
carrera adelante. A mis padres quienes con su arduo trabajo y su
amor incondicional hicieron de mí lo que soy hoy en día. A mi
hermana Maria Paula que supo cómo subirme el ánimo en los momentos
difíciles.*

*A mi amigo y compañero de universidad Sergio Oswaldo Ardila Riobo,
con quien desde el inicio de nuestra carrera compartimos y luchamos por
cumplir nuestro sueño de ser Ingenieros de Petróleos UIS.*

*A la familia Verano Castillo que fue mi familia adoptiva y me acogieron
como un integrante más mientras realice el ciclo básico de la carrera en la sede
UIS Barbosa.*

Julian Ricardo Clavijo Martinez

AGRADECIMIENTOS

El autor del presente trabajo de grado por medio de estas líneas desea expresar sus más sinceros agradecimientos a:

Al PH.D. Emiliano Ariza León, director del proyecto, por contribuir con la idea para el proyecto y estar siempre pendiente de los avances mediante sus aportes y sugerencias.

A la UIS sede Barbosa, que me recibió en el inicio de este proceso de aprendizaje.

A todos los docentes de la universidad industrial de Santander por su valioso tiempo dedicado a compartir su conocimiento conmigo, ya que me dieron las herramientas necesarias para asumir la vida profesional como ingeniero de petróleos.

Contenido

	Pág.
RESUMEN.....	9
ABSTRACT	10
Introducción	11
1. Fundamentos En Limpieza De Pozos	13
1.1. Parámetros De Perforación Que Influyen En La Limpieza Del Pozo.....	13
1.1.1. Propiedades del fluido de perforación.	14
1.1.2. Efecto de la tasa de flujo	24
1.1.3. Características de los recortes de perforación.....	25
1.1.4. Rotación de la sarta de perforación.....	26
1.1.5. Excentricidad de la sarta de perforación	29
1.1.6. Tamaño del hueco	32
1.1.7. Angulo del pozo.....	32
1.1.8. Velocidad de perforación (ROP)	35
1.2. Velocidad anular (Vann).....	37
1.3. Velocidad de deslizamiento (Vs)	37
1.4. Geología de la formación.....	37
1.5. Comparación de limpieza en huecos verticales y desviados.....	39
1.5.1. Análisis de la limpieza en huecos verticales.....	40
1.5.2. Análisis de la limpieza en huecos desviados y horizontales	429
Gráficos Para Evaluar La Limpieza De Pozos Desviados Y Horizontales	43
2. Modelos De La Limpieza De Pozo	50
2.1. Problemas Operacionales Por Mala Limpieza Del Pozo	50
2.2. Indicadores De Limpieza De Hueco	53
2.2.1. Hidráulica de perforación y parámetros de limpieza	55
2.2.2. Pérdida de presión en el anular	56
2.2.3. Densidad equivalente de circulación (ECD).....	59
2.2.4. Volumen y concentración de ripios	59
2.3. Análisis de indicadores de limpieza.....	60
2.3.1. Índice de capacidad de carga (CCI).....	61
Índice de capacidad de carga para pozos desviados y horizontales	62
Índice de consistencia (K)	63

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

Índice de comportamiento de flujo (n)	63
Velocidad anular (Vann)	64
2.3.2. Concentración de cortes en el anular (CCA)	65
Relación de transporte (TR)	67
3. Análisis De La Limpieza De Pozo Y Su Efecto En El Avance De La Perforación.....	69
3.1. Análisis de la velocidad de perforación con el CCI	7874
3.2. Relación entre la viscosidad plástica (VP) y el yield point (YP)	78
3.3 Índice de consistencia(K) y de comportamiento de flujo (n).....	81
3.4. Análisis de la velocidad de perforación con el (CCA).....	84
4. Propuesta de un nuevo indicador de limpieza de hueco (HCI).....	87
4.1. Análisis de sensibilidad.....	89
4.2. Consistencia del (HCI) con los índices (CCA) y (CCI).....	95
5. Conclusiones	97
6. Recomendaciones.....	97
Referencias Bibliográficas.....	99

Listado de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Parámetros críticos de limpieza en pozos desviados	34
Tabla 2 Factor de ángulo para pozos desviados	46
Tabla 3 Problemas y su impacto por acumulación de sólidos en el anular.	65
Tabla 4 Modelos previos experimentales y teóricos de limpieza de pozo	68
Tabla 5 Características del pozo caso base	70
Tabla 6 Parámetros de perforación que optimizan la ROP y limpieza de pozo.	86

Listado de figuras

	Pág.
Figura 1 Perfil de velocidad para flujo tapón.	18
Figura 2 Perfil de velocidad para flujo laminar.	19
Figura 3 Perfil de velocidad para flujo turbulento.....	20
Figura 4 Efecto del yield point sobre el caudal crítico.	21
Figura 5 Patrones de flujo con partículas.	22
Figura 6 Fuerzas que actúan en el transporte de recortes.	24
Figura 7 CTR vs velocidad del fluido con tamaño de partícula de 3.35 mm	32
Figura 8 CTR vs velocidad del fluido con tamaño de partícula de 1.7 mm	32
Figura 9 Representación de la excentricidad de la tubería	32
Figura 10 Cama de recortes presente al apagar la bomba	34
Figura 11 Tendencia de caída de recortes vs carácter de la formación.....	38
Figura 12 Velocidad de deslizamiento vs Relación de transporte.....	41
Figura 13 Factor reológico para pozos desviados de 17-1/2”.....	44
Figura 14 Factor reológico para pozos desviados de 12-1/4”.....	44
Figura 15 Factor reológico para pozos desviados de 8-1/2	45
Figura 16 Relación ROP y caudal crítico para pozos desviados de 17-1/2”.	47
Figura 17 Relación ROP y caudal crítico para pozos desviados de 12-1/4”.	48
Figura 18 Relación ROP y caudal crítico para pozos desviados de 8-1/2”.	48
Figura 19 Factores que afectan el transporte de recortes.	54
Figura 20 Relación de viscosidad plástica y yield point.	79
Figura 21 Relación entre índice de comportamiento de flujo y PV/YP.	80
Figura 22 Relación entre YP/PV y el índice de capacidad de carga	81
Figura 23 Relación entre el índice de consistencia y el índice de capacidad de carga.	82
Figura 24 Relación K vs CCI a partir de datos de campo	783
Figura 25 Relación entre el índice de comportamiento y el índice de capacidad de carga.	783
Figura 26 Relación entre la concentración de cortes en el anular y ROP.	84
Figura 27 Relación CCA vs ROP a partir de datos de campo	85
Figura 28 Relación entre ROP y el índice de limpieza de hueco	88
Figura 29 Relación entre el índice de consistencia y ROP.....	89
Figura 30 Análisis de sensibilidad con el caudal Q.....	90
Figura 31 Análisis de sensibilidad con el peso del lodo (MW)	91
Figura 32 Análisis de sensibilidad con el índice de consistencia (k).....	87
Figura 33 Análisis de sensibilidad con el diámetro del hueco (Dh).	88
Figura 34 Análisis de sensibilidad con la velocidad de deslizamiento (Vs).....	88
Figura 35 Relación entre ROP y el índice de limpieza de hueco para el caso base.	96

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACION DE LOS PARAMETROS DE LIMPIEZA DEL POZO Y SU IMPACTO EN LA VELOCIDAD DE PERFORACION*

AUTORES: JULIAN CLAVIJO MARTINEZ**

PALABRAS CLAVE: Índice de capacidad de limpieza de pozo, concentración de cortes en el anular, velocidad de perforación, limpieza del pozo, propiedades reológicas.

DESCRIPCIÓN:

Muchos problemas de perforación como pérdida de circulación, obstáculos en la tubería de revestimiento, cementación deficiente, la necesidad de volver a perforar y pegas mecánicas causados por acumulación de cortes en el pozo pueden evitarse mediante una buena limpieza durante la operación de perforación, especialmente en pozos direccionales. Este proyecto está enfocado en analizar los parámetros que influyen de manera directa e indirecta en la limpieza del pozo, así como los problemas operacionales que se presentan debido una inadecuada limpieza, con el fin de optimizar la velocidad de penetración y reducir costos de operación.

Los índices de capacidad de carga y de concentración de cortes en el anular son herramientas útiles e importantes que permiten evaluar el proceso de transporte de sólidos a superficie y su relación con la optimización de la velocidad de perforación a partir de parámetros de perforación como las propiedades reológicas del fluido de perforación, el caudal de bombeo y la velocidad anular. Sin embargo, cada índice empleado de manera individual está limitado respecto a la información brindada para relacionar la limpieza de sólidos con la velocidad de perforación. Es por ello que se hace el planteamiento de un nuevo índice de limpieza de hueco que permite analizar y optimizar la ROP en función de las propiedades del lodo, geometría del pozo y caudal de trabajo con adecuada limpieza del hueco, mitigando otros problemas operacionales.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: PhD. Emiliano Ariza Leon.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF HOLE CLEANING PARAMETERS AND THEIR IMPACT ON THE RATE OF PENETRATION *

AUTHORS: JULIAN CLAVIJO MARTINEZ**

KEY WORDS: Carrying capacity index, Cutting concentration in the annulus, Rate of penetration, Hole cleaning, Rheological properties.

DESCRIPTION:

Many drilling problems such as loss of circulation, casing obstructions, poor cementing, the need to re-drill, and mechanical stuck caused by cutting accumulation in the wellbore can be avoided by good hole cleaning during the drilling operation. especially in directional wells. This project is focused on analyzing the parameters that directly and indirectly influence the hole cleaning, as well as the operational problems that take place due to inadequate cleaning, in order to optimize the rate of penetration and reduce operating costs.

The indexes of carrying capacity and cutting concentration in the annulus are two useful and important tools that allow to evaluate the process of transport of solids to the surface and its relationship with the optimization of the rate of penetration from drilling parameters such as rheological properties of the fluid drilling, pumping flow and annular velocity. However, each index used individually is limited in the information provided to relate solid cleanliness to rate of penetration. That is why a new hole cleaning index is proposed to analyze and optimize the ROP based on the properties of the mud, geometry of the well and flow rate with adequate cleaning of the hole, mitigating other operational problems.

*Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: PhD. Emiliano Ariza Leon.

Introducción

La optimización de la limpieza del pozo durante el proceso de perforación permite maximizar la velocidad de perforación, sin embargo, asegurar una adecuada limpieza sigue siendo uno de los mayores retos para la ingeniería de perforación, ya que son diversos los parámetros que tienen un gran impacto en la limpieza de hueco. En pozos verticales normalmente se puede incrementar la eficiencia de transporte de recortes con el aumento de la velocidad anular que es directamente proporcional al caudal de flujo del lodo, para pozos desviados la eficiencia de limpieza se ve afectada por el ángulo de desviación del mismo, siendo más complejo el transporte de sólidos en pozos que tienen un ángulo en el rango de 50° a 60° por presentar mayor acumulación de recortes.

Una limpieza insuficiente puede conducir a problemas de tubería atascada, disminución de la velocidad de perforación, aumento en arrastre y torsión significativos, pérdida de circulación, inestabilidad del pozo, tendencias erráticas en ECD, más viajes para rectificar y limpiar el hueco, mala calidad de los trabajos de cemento y aumento del tiempo de operación y por ende en los costos de las operaciones de perforación. es por esto, que a menudo es el factor decisivo entre el éxito y el fracaso durante la perforación de un pozo.

Se han utilizado varios modelos para optimizar la limpieza del pozo. A pesar del gran aporte están limitados a determinadas aplicaciones. Los modelos más destacables son Li (1999), Ford (1990), Okraini(1986), Brown (1989). Estos modelos, cuando se aplican, muestran una mejora, pero no se recomiendan en todas las operaciones de perforación. Brown (1989), Terry (1993) y

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

Ford (1994) realizaron varios estudios experimentales y teóricos. Su objetivo era mejorar los resultados de la limpieza del pozo. Por ejemplo, se estudiaron varios factores para incluir la velocidad anular requerida en el espacio anular, las propiedades del lodo, el sistema de lodo y las pérdidas de presión por fricción.

Hopkin (1967) probó más de 2000 partículas dinámicas que transportan pruebas con tubos verticales de 8 pies y 4 ½ pulgadas de diámetro con 13 tipos de lodos de perforación y 52 partículas de diferentes formas y tamaños. Usó regímenes de flujo (laminar, transicional y turbulento) para hacer circular las partículas desde la parte inferior del tubo hacia la parte superior. Además, las viscosidades del embudo de marcha del lodo variaron de 26 a 1000 segundos / cuarto de galón. Encontró una relación entre la velocidad de deslizamiento con el embudo de marcha, el punto de fluencia y el peso del lodo.

El presente trabajo busca evaluar el proceso de limpieza del pozo mediante la concentración de corte en el espacio anular (CCA), la cual permite determinar el número de cortes que se realizan durante la perforación y se cargan en el espacio anular y el índice de capacidad de carga (CCI) que es un índice simple para ayudar a predecir la limpieza del pozo, estas son las herramientas más importantes que se deben considerar para garantizar una limpieza óptima del pozo y un rendimiento en la velocidad de perforación, sin comprometer la estabilidad del pozo. Sin embargo, el uso de (CCI) solo da una idea de cómo se limpia la sección del pozo, pero no informa sobre el rendimiento de la velocidad de perforación. Por otro lado, (CCA) tiene un límite de la velocidad máxima de perforación que se puede alcanzar sin causar problemas de pozo o acumulación de cortes. Como valor agregado del presente trabajo se propone un nuevo índice de limpieza de pozo a partir de los indicadores CCI y CCA.

1. Fundamentos En Limpieza De Pozos

Con la limpieza de pozos se busca evaluar los efectos de remoción, acarreo y concentración de los recortes generados durante la perforación mediante el análisis de las propiedades reológicas y tixotrópicas del fluido de perforación y los parámetros de perforación, con el objetivo de:

1. Asegurar una buena limpieza en el espacio anular.
2. Evitar la erosión del pozo debido al flujo turbulento en el espacio anular.
3. Eludir la inestabilidad del pozo y problemas para el control de la presión, debido a diferencias de presiones ocasionadas por sacar la tubería de forma violenta para evitar el suabeo.
4. Evitar correr la tubería en el pozo demasiado rápido, para no provocar pérdidas de circulación por surgencia.

1.1.Parámetros De Perforación Que Influyen En La Limpieza Del Pozo

Para lograr una efectiva operación de perforación, la limpieza del pozo debe ser diseñada para garantizar un óptimo transporte de los recortes desde la sección que se está perforando hasta la superficie. Para este diseño de limpieza se deben considerar los parámetros de perforación que más influyen como lo son las propiedades del fluido de perforación, la rotación y excentricidad de la sarta, el tamaño y ángulo del pozo y la velocidad de perforación.

1.1.1. Propiedades del fluido de perforación.

Un fluido de perforación se define de acuerdo al API, como: "El fluido de circulación usado en las operaciones de perforación rotatoria, empleado para cumplir una o todas las funciones requeridas durante esta operación. Dentro de las funciones más relevantes del fluido de perforación están:

- Limpiar los recortes de perforación
- Transmitir la energía hidráulica a las herramientas y a la broca
- Suspender y descargar los recortes
- Controlar las presiones de la formación
- Mantener la estabilidad del hueco
- Obturar las formaciones permeables
- Minimizar los daños al yacimiento
- Enfriar, lubricar y suspender la broca y el conjunto de perforación
- Asegurar una evaluación adecuada de la formación
- Controlar la corrosión
- Facilitar la cementación y el completamiento
- Minimizar el impacto ambiental
- Impedir la formación de hidratos de gas

Los fluidos de perforación necesitan contar con una serie de propiedades, las cuales son controladas según los tipos y las concentraciones de los aditivos que se incluyan en la formulación del lodo. Estas son las propiedades de fluido de perforación más importantes en la limpieza del pozo

1.1.1.1. Viscosidad aparente (VA)

“Resultante de la división del esfuerzo cortante entre la velocidad de deformación del fluido, cuando su comportamiento es no lineal. Esta propiedad varía según el gradiente de velocidad de

la materia. Expresada en [cP].” (Energy API, 2012).

1.1.1.2. Viscosidad plástica (PV)

“Se define como “la resistencia al flujo” debido a fricciones mecánicas entre las partículas sólidas suspendidas en el fluido. La PV depende principalmente del contenido de sólidos y de la forma y el tamaño de estos sólidos.” (Energy API, 2012).

“Se puede calcular la viscosidad plástica partiendo de la diferencia entre las lecturas de 600 y 300 rpm obtenidas del viscosímetro. Expresada en [cP].” (Energy API, 2012).

1.1.1.3. Punto de cedencia (YP)

“Es el esfuerzo mínimo de corte que debe aplicarse a un fluido para que comience a desplazarse. Valor de la resistencia al flujo, debida a las fuerzas de atracción que existen entre las partículas o sólidos en suspensión. Se expresa en [lb/100 ft²].” (Barnes, 2015).

1.1.1.4. Esfuerzo de gel

Existe una fuerza aplicada (F) que actúa sobre un área (A) que provoca que las capas de un fluido se deslicen una sobre otra. Sin embargo, hay una resistencia, o arrastre por fricción, que se opone a la fuerza de movimiento de estas placas, haciendo que el fluido se mueva a una velocidad constante. Esta resistencia o fuerza de arrastre se llama esfuerzo de corte (τ). En forma de ecuación:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

El esfuerzo cortante tiene unidades típicas de lbf/100 ft².

1.1.1.5. Índice de comportamiento del fluido (n)

Es la relación numérica entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte de un fluido en un gráfico “log/log”. Este valor describe el grado de comportamiento adelgazante por corte de un fluido, es decir, la capacidad de un fluido para reducir la viscosidad por corte.

“Es una medida de los fluidos no-newtonianos, entre más alejado de la unidad sea el valor de n, mas no-newtoniano es el comportamiento de fluido.” (Pennwell Publishing Company, 1996).

1.1.1.6. Índice de consistencia (k)

“Indica la consistencia del fluido, dado que el aumento de “k” indica un aumento en la concentración de sólidos o disminución del tamaño de las partículas, es decir, si el valor de “k” es alto, el fluido es más viscoso y si el valor de “k” es bajo, el fluido es menos viscoso. Se expresa en [cP].” (Pennwell Publishing Company, 1996).

1.1.1.7. Peso del lodo (MW)

El peso del lodo, expresado en libras por galón (LPG), depende del tipo de líquido usado y del material densificante; el peso del lodo debe ser suficiente para contener el fluido de la formación, pero no muy alto como para fracturar la formación. Es importante también mantener el peso del lodo para proporcionar soporte de las formaciones expuestas en el hueco abierto, se determina empleando una balanza de lodos (permite conocer, además de la densidad en lbs/gal y lbs/pie³, la gravedad específica y gradiente de presión por cada mil pies).

El aumento de la densidad del fluido va a causar un incremento en la flotabilidad proveyendo una mejora en la limpieza del pozo a cualquier inclinación. En la mayoría de los casos, la selección de la densidad es usualmente predeterminada por la presión de poro, la mecánica de la roca, los esfuerzos tectónicos en el lugar, el gradiente de fractura, y la densidad requerida para estabilizar el pozo y evitar derrumbamientos.

1.1.1.8. Régimen de flujo y reología del lodo

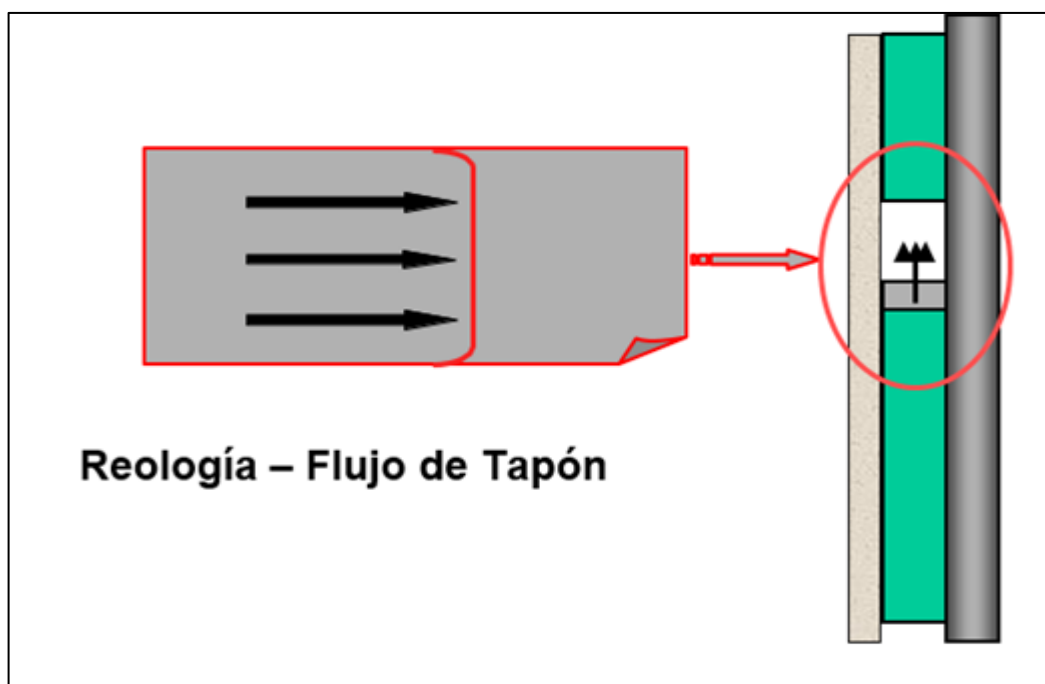
El régimen de flujo es un tipo de relación entre la presión y la velocidad. Hay tres tipos de regímenes de flujo: Flujo tapón, laminar y turbulento. La forma del perfil del flujo anular, depende del régimen que hay en este.

- **Flujo tapón (de pistón)**

El flujo tapón es un modelo simple del perfil de velocidades de un fluido que fluye en una tubería. En la figura 1 se observa como la velocidad del fluido se supone que es constante a través de cualquier sección transversal al eje de la tubería en el flujo tapón. El modelo asume que no hay capa límite adyacente a la pared interior del tubo. El flujo Tapón se alcanza a valores muy bajos de número de Reynolds, esto sucede cuando se excede el esfuerzo de cedencia verdadero y el flujo comienza en la forma de un tapón sólido.

Figura 1

Perfil de velocidad para flujo tapón.



Nota: Castillejo (2021). Adaptado de Curso limpieza de pozo e hidráulica de la perforación ACIPET.

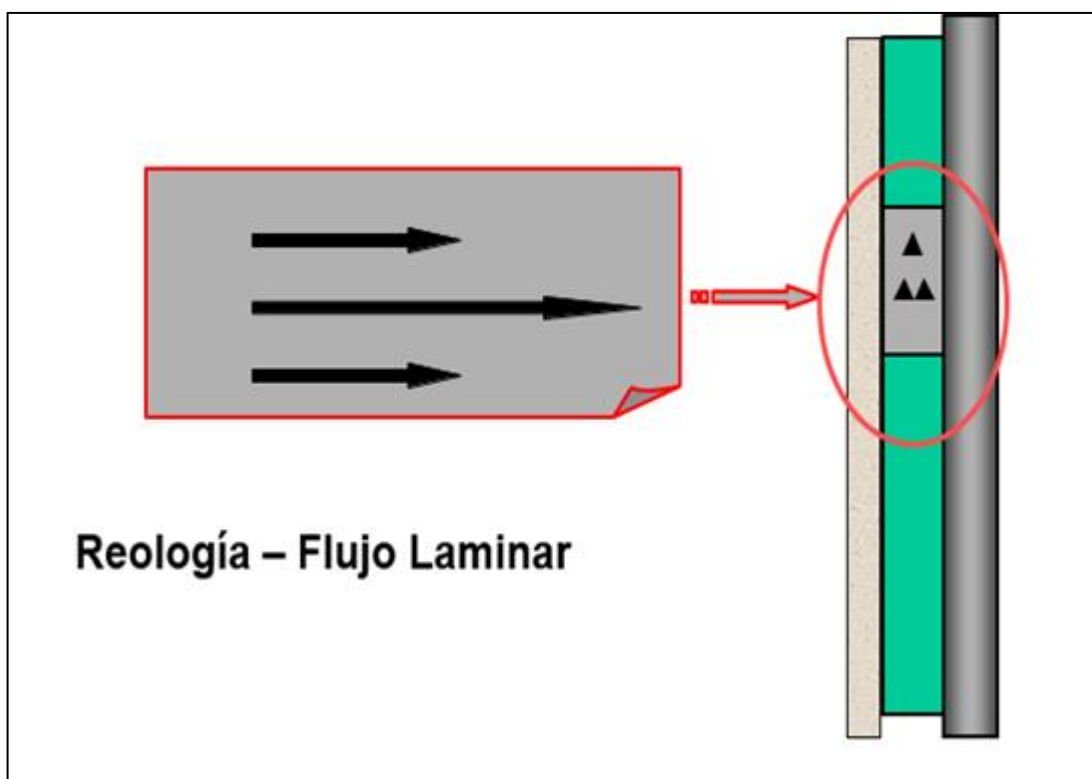
En este tipo de flujo se tiene una presión suficiente para mover el fluido como un tapón sólido y la velocidad es igual en el centro y en la pared. El fluido en flujotapón tiene gran capacidad de transporte y es característico de los fluidos no dispersos.

- **Flujo laminar**

En flujo laminar, las partículas del líquido se mueven siempre a lo largo de trayectorias uniformes, en capas o láminas, con el mismo sentido, dirección y magnitud. En la figura 2 se observa como en tuberías de sección circular, si se hace un corte transversal, las capas de igual velocidad se disponen de forma concéntrica, con velocidad mayor a cero junto a las paredes de la tubería y velocidad máxima en el centro.

Figura 2

Perfil de velocidad para flujo laminar.



Nota: Castillejo (2021). Adaptado de Curso limpieza de pozo e hidráulica de la perforación ACIPET.

- **Flujo turbulento**

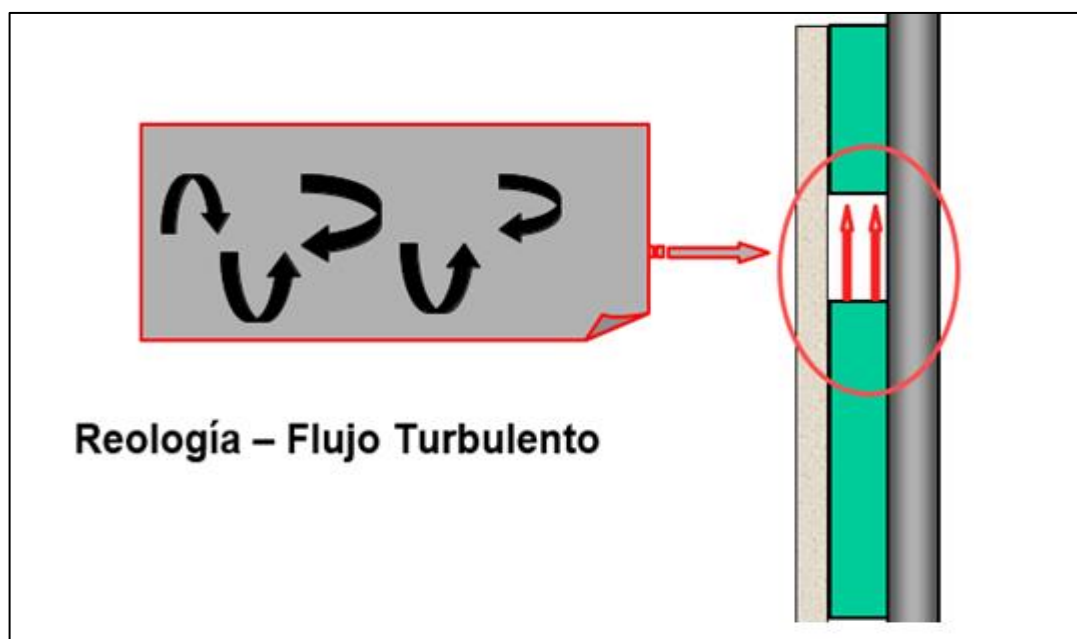
El perfil de velocidad de los fluidos no newtonianos en flujo turbulento es parecido al régimen de flujo tapón, con la diferencia de que las partículas se mueven en una forma desordenada y son arrastradas por remolinos de corriente, esto es ilustrado en la figura 3. El flujo turbulento se logra a altas velocidades de corte cuando la velocidad anular supera a la crítica. Este tipo de flujo causa problemas de derrumbes y lavado de hoyo (washout). La fricción entre el fluido y la pared del hoyo es mayor para este tipo de flujo.

El flujo turbulento es muy útil en la remoción de camas de recortes ya que este tipo de flujo

genera un desorden de sólidos, que posteriormente pueden ser transportados hasta superficie por los flujos tapón y laminar.

Figura 3

Perfil de velocidad para flujo turbulento.



Nota: Castillejo (2021). Adaptado de Curso limpieza de pozo e hidráulica de la perforación ACIPET.

Para ángulos por encima de 40° El flujo turbulento o de transición y un fluido de baja reología es el más efectivo para minimizar la formación y remoción de lechos de recortes.

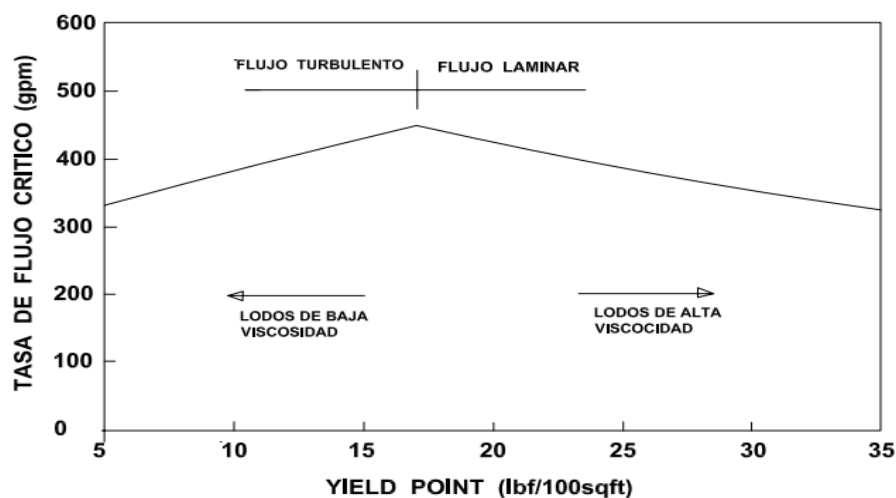
Cuando se trata de flujo laminar, la fuerza de arrastre es la que domina, mientras que, en el flujo turbulento, la fuerza de elevación es más importante. Esto determina que los efectos de la reología del lodo y el régimen de flujo son mutuamente dependientes; Esto se puede apreciar la figura 4. En flujo turbulento, un yield point más bajo da como resultado una intensidad turbulenta mayor y, por lo tanto, una fuerza de elevación más alta para transportar los esquejes por saltación. Por lo tanto, la reducción del yield point en flujo turbulento reducirá el caudal crítico (CFR) y mejorará la limpieza del pozo. Sin embargo, en flujo laminar, un yield point

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

mayor corresponde a una fuerza de arrastre del fluido más alta que elimina los recortes como lecho deslizante. Por lo tanto, se prefieren los lodos con alto yield point en flujo laminar para la limpieza de pozos.

Figura 4

Efecto del yield point sobre el caudal crítico.



Note: Yuejin (1994). Adaptado de Simple Charts To Determine Hole Cleaning Requirements.

El valor de YP correspondiente a la transición del régimen de flujo proporciona la peor limpieza del pozo y, por lo tanto, debe evitarse. Tanto aumentar como reducir el YP desde este punto mejorará la limpieza del pozo. Para el caso que se muestra en la figura 4, esto es alrededor de un YP de 17 lbf / 100 ft². A medida que cambien las condiciones, este punto cambiará a un YP más bajo o más alto. Por ejemplo, a medida que aumenta el tamaño del pozo, el flujo estará cada vez más dominado por el flujo laminar en condiciones normales de perforación, por lo que el peor punto YP se mueve hacia la izquierda.

- **Patrones de flujo**

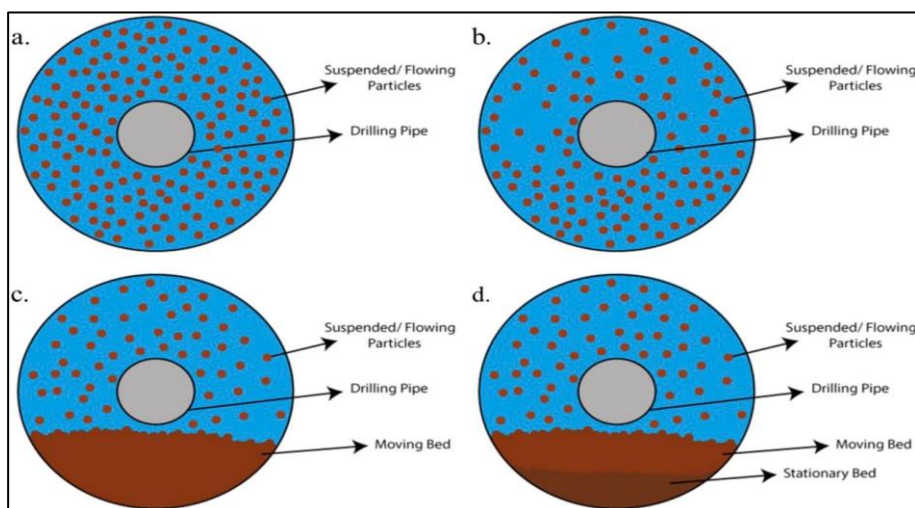
Una vez que la operación de perforación avanza se generan cortes en la broca. Los recortes de

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

roca se mezclan con el lodo y fluyen como un sistema sólido-líquido. La distribución de los recortes en el sistema durante el flujo depende de varios parámetros, incluidos el caudal, el ángulo de inclinación, la geometría del pozo y las propiedades de los sólidos y los líquidos. Una mezcla de recortes y lodo que fluye en pozos horizontales puede exhibir cuatro tipos de patrones de flujo simétrico completamente suspendido (a), asimétrico completamente suspendido (b), capa completamente suspendida con un lecho móvil (c) y capa completamente suspendida con lechos estacionarios y móviles (d) (Kelessidis y Mpandelis, 2003). La figura 5 describe los cuatro patrones de flujo simétrico mencionados anteriormente.

Figura 5

Patrones de flujo con partículas.



Nota: Tomado de Hole cleaning and drilling fluid sweeps in horizontal and deviated wells:

Comprehensive review (p. 3) por Husameldin (2020)

Los patrones de flujo simétricos completamente suspendidos ocurren a velocidades extremadamente altas. Las partículas sólidas finas ($d < 1$ mm) se distribuyen completa y uniformemente en el líquido cuando se evita la sedimentación de partículas mediante una mezcla

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

turbulenta fuerte. Este patrón de flujo normalmente no ocurre durante la perforación. Los patrones de flujo asimétrico ocurren cuando la velocidad se reduce y la mayoría de las partículas sólidas tienden a fluir cerca del fondo, aunque algunas están completamente suspendidas, lo que crea concentraciones asimétricas de sólidos. Los patrones de lecho en movimiento se observan una vez que el caudal se reduce aún más (caudales bajos), lo que da como resultado la sedimentación de partículas en el fondo del orificio que forma un lecho sólido en movimiento y una capa de suspensión sobre el lecho con una distribución no uniforme de partículas sólidas.

La velocidad mínima de movimiento del lecho generalmente se denomina velocidad crítica. Reducir la velocidad por debajo de la velocidad crítica da como resultado la formación de tres capas, lo que constituye el escenario de caso más realista. Las tres capas incluyen un lecho estacionario como la capa inferior, el lecho móvil como la capa intermedia y la capa de suspensión, que es una mezcla heterogénea de sólido-líquido que se mueve como la capa superior. Las capas media y superior tienen una fuerte interacción; ambas capas intercambian partículas sólidas rodando o saltando hasta que se establece una condición de equilibrio. Sin embargo, a medida que aumenta la altura del lecho deja menos área para el flujo, por lo que aumenta la velocidad de la capa superior lo que potencia la erosión del lecho por la mezcla heterogénea (Kelessidis y Mpandelis, 2003; Yeu et al., 2019; Cho et al., 2000; Shu et al., 2015; Mohammadsalehi y Malekzadeh, 2012).

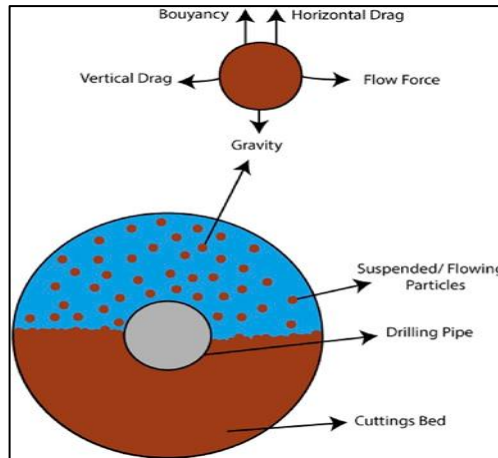
Diferentes fuerzas actúan sobre una partícula suspendida en un fluido que fluye. La figura 6 muestra las principales fuerzas que actúan sobre los recortes de perforación, que afectan el proceso de limpieza del pozo. Las fuerzas hidrodinámicas de arrastre y suspensión actúan sobre

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

las partículas de corte, la fuerza de arrastre es una función del área de proyección de la partícula, el coeficiente de arrastre y la velocidad relativa entre la partícula y el fluido circundante. La Fuerza de gravedad que está relacionada con la masa de la partícula y la aceleración gravitacional. La fuerza de flotabilidad depende de la densidad del fluido, el tamaño de las partículas y la aceleración gravitacional.

Figura 6

Fuerzas que actúan en el transporte de recortes.



Nota: Tomado de Hole cleaning and drilling fluid sweeps in horizontal and deviated wells:

Comprehensive review (p. 3) por Husameldin (2020)

1.1.2. Efecto de la tasa de flujo

Al perforar un pozo desviado, uno de los parámetros clave que debe determinarse es el caudal mínimo requerido para transportar los recortes hasta la superficie y mantener el pozo limpio. Este caudal mínimo se denomina "caudal crítico" (CFR). Si se usa una tasa de flujo inadecuada, los recortes se asentarán en el lado bajo del pozo y formarán un gran lecho estacionario que

puede resultar en graves problemas de perforación. Es fundamental conocer el CFR al planificar y perforar un pozo desviado para poder seleccionar el equipo de perforación adecuado. Esto se ha vuelto cada vez más importante en los últimos años, ya que las demandas de los desarrollos de campo han dictado pozos de mayor ángulo y alcance más alto.

1.1.3. Características de los recortes de perforación

Los factores importantes de los sólidos que afectan el rendimiento del fluido son el tipo, el tamaño y la forma. Estas características dependen de la fuente de los sólidos, ya sea de lutita perforada, de roca dura, etc. Los sólidos perforados en un sistema de fluidos a menudo se clasifican como inertes o activos. Los sólidos inertes son aquellos que no hidratan a ningún otro componente del fluido, por ejemplo, materiales tales como arenas, piedra caliza, limo, feldespato. Estos sólidos inertes generalmente se consideran indeseables en el sistema de fluidos porque sobrecargan el sistema y, al hacerlo, fuerzan a los sólidos activos a acercarse entre sí y causar problemas de viscosidad.

Los sólidos activos son la fracción arcillosa de las lutitas que tienen un área de superficie elevada, y al ser electroquímicamente activos, los sólidos de arcilla se atraen fuertemente entre sí y hacia los iones y polímeros en el sistema de fluidos. Los sólidos perforados se clasifican como sólidos de baja gravedad (LGS). Los sólidos como la piedra caliza y la dolomita son inertes con rango de gravedad específica (SG) de 2,7 - 2.9. La lutita puede variar de activa a inerte y tiene un rango de (SG) de 2.4 - 2.8, dependiendo de su contenido de agua. Sin embargo, se necesita una distribución de formas y tamaños de partículas para formar una buena torta de filtración. Esta es la fórmula aplicada por (Guzmán 2003) para determinar la forma de los ripios perforados,

$$Factor\ de\ forma(Redondez) = \frac{Perimetro^2}{4\pi Area}$$

Los valores cercanos a 1.000 indican formas redondeadas regulares. Los valores más altos sugieren formas prismáticas y muy angulares.

Cuanto más secos, más firmes y pequeños sean los recortes, más fácil será extraerlos del hueco. Cuando se utiliza broca pequeña de diamante policristalino (PDC), los pequeños cortadores de la broca generan pequeños cortes, que se asientan más lentamente que los grandes y se arrastran más fácilmente en la columna anular de fluido de perforación mediante la rotación de la sarta de perforación. Según la ley de Stokes, los cortes grandes se caerán de la suspensión más rápidamente que los cortes más pequeños, pero en los hoyos de ángulo alto, incluso los cortes más pequeños pueden asentarse y formar un lecho de recortes. Los recortes redondeados o aglomerados son indicativos de un período prolongado de tiempo en el pozo y una mala limpieza del hueco.

1.1.4. Rotación de la sarta de perforación

A medida que aumenta la velocidad de rotación de la tubería, la tubería arrastra más fluido con ella. En los pozos desviados, esta capa de fluido de perforación altera los lechos de recortes que se han formado alrededor de la tubería mientras se encuentra en el lado inferior del orificio. Los cambios en los pasos parecen ser la norma, y en la mayoría de los casos ocurren a aproximadamente 80, 120 y 180 rpm (Mohamed, 2018). Existe cierta evidencia de que, por encima de 180 rpm, se produce un flujo turbulento para muchos fluidos. En estos niveles altos, parece que hay poco beneficio adicional para la limpieza de hoyos al aumentar aún más la

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

rotación de la tubería; lo más probable es que esto se deba a que los lechos de ripios no pueden formarse en un flujo turbulento. Durante el deslizamiento, la limpieza de los orificios es mínima y es probable que se formen lechos de recortes. Por lo tanto, el deslizamiento debe mantenerse al mínimo durante cualquier operación de perforación.

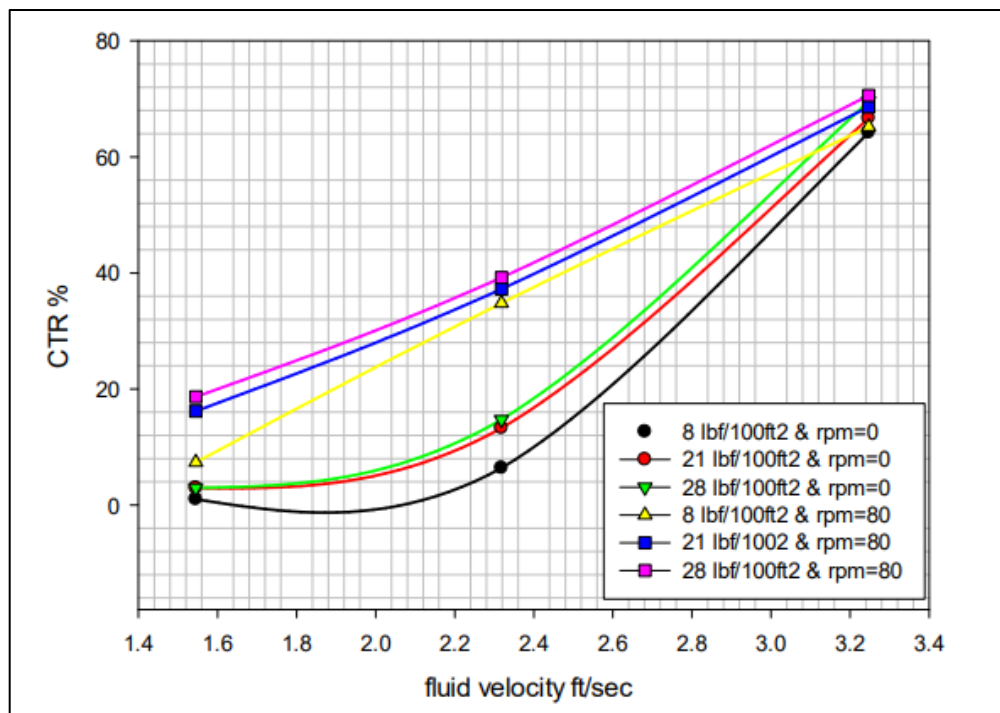
La rotación de la tubería ayudará a alterar mecánicamente los lechos de recortes, permitiendo una mejor remoción. La rotación de la tubería mientras se perfora puede mejorar la eficiencia de limpieza del pozo aproximadamente en un 25 a 40 %, dependiendo de la velocidad y propiedades reológicas del fluido y el tamaño de partícula, como se puede observar en la figura 7 y 8. Si un deslizamiento excesivo para trabajo direccional se está realizando, una rotación ocasional de la tubería de perforación a alta velocidad va a ayudar a reducir la formación de lechos de recortes.

Las figuras 7 y 8 muestran el comportamiento de la relación del transporte de recortes (CTR%) con respecto a la velocidad del fluido en el anular(ft/s) para valores de yield point de 8, 21 y 28 lbf/100 ft² con y sin rotación de la tubería (0 y 80 rpm).

Figura 7

CTR vs velocidad del fluido con tamaño de partícula de 3.35 mm

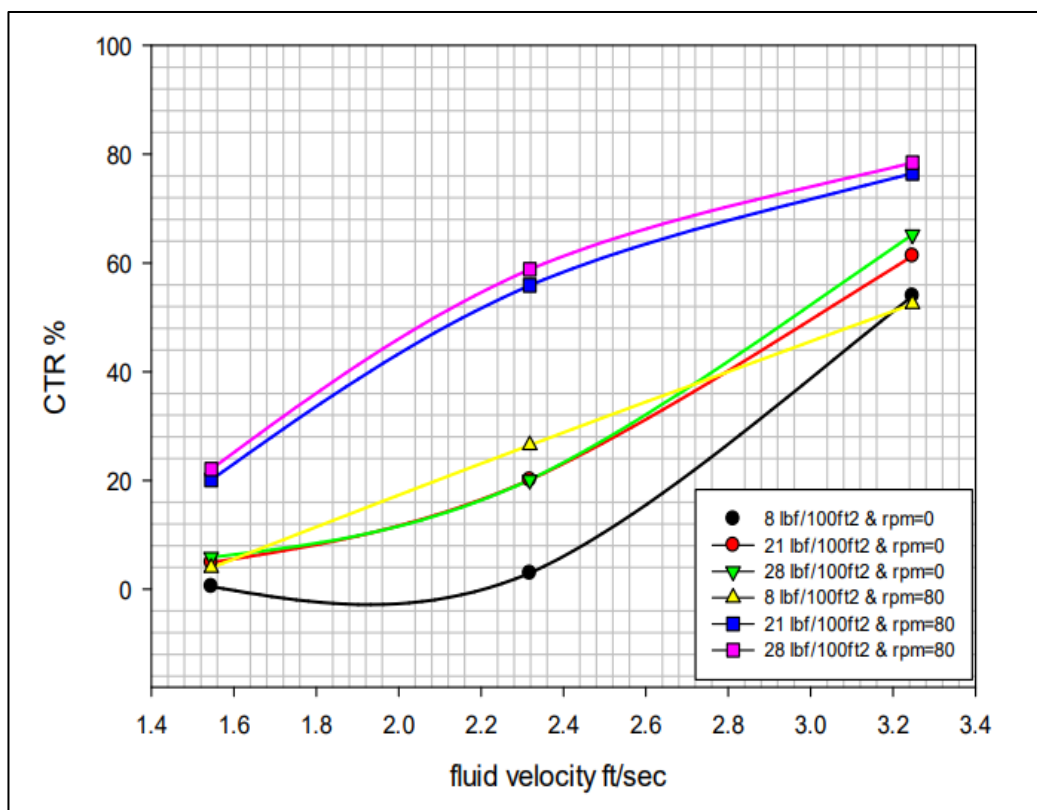
IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION



Nota: Tomado de Better Hole Cleaning In Highly Deviated Wellbores, Raed H. Allawi and Faleh H. M. Almahdawi 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 579 012007. En este caso, para velocidades de fluido entre 2.2 y 2.4 ft/sg se observa un incremento de aproximadamente el 25 % en el transporte de recortes debido al efecto de la rotación de la tubería.

Figura 8

CTR vs velocidad del fluido con tamaño de partícula de 1.7 mm



Nota: Tomado de Better Hole Cleaning In Highly Deviated Wellbores, Raed H. Allawi and Faleh H. M. Almahdawi 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 579 012007. En este caso, para velocidades de fluido entre 2.2 y 2.4 ft/s y YP de 28 lbf/100 ft² se observa un incremento de aproximadamente el 40 % en el transporte de recortes debido al efecto de la rotación de la tubería.

1.1.5. Excentricidad de la sarta de perforación

Término utilizado para describir cuán descentrada se encuentra una tubería dentro de otra tubería o dentro del agujero descubierto. Se expresa generalmente como un porcentaje. Una tubería se consideraría completamente (100%) excéntrica si la tubería se recuesta sobre el pozo que la contiene. Se hablaría de una tubería concéntrica (0% excéntrica) si estuviera perfectamente centrada en la tubería externa o el pozo. La excentricidad se vuelve importante para el diseñador de pozos en la modificación del desgaste de la tubería de revestimiento.

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

En pozos verticales, el comportamiento de los recortes es casi el mismo para todas las excentricidades. En pozos de alto ángulo, hay una disminución notable en la velocidad de los recortes en el área reducida del anular, formando las camas de recortes que complican su transporte hasta superficie.

La excentricidad de la tubería tiene un efecto insignificante en la limpieza del pozo a baja ángulos de inclinación ($0-55^\circ$) tanto para flujos turbulentos como laminares

(Okrajni y Azar, 1986). El efecto se hace más notorio con inclinaciones más altas ($55^\circ - 90^\circ$).

La excentricidad crea dos regiones en la sección transversal del flujo, regiones anchas y estrechas. La tubería hace que el fluido fluya rápidamente en la región ancha mientras que hace que el fluido fluya lentamente en la región estrecha. Con la rotación de la sarta de perforación, los efectos de la pared y la tubería se complican y provocan una reducción en la velocidad del flujo a un gradiente de presión dado. La rotación de la tubería hace que el fluido se mueva en una trayectoria helicoidal desde la región estancada estrecha hasta la región ancha de alta velocidad o viceversa. El flujo crea una aceleración alterna del fluido, lo que resulta en un aumento de la pérdida de presión por fricción (Loklingholm, 2002).

La tubería de perforación se encuentra generalmente en el lado bajo del pozo y su factor de excentricidad es de $1 \geq \epsilon \geq 0$; si el tubo de perforación se encuentra en el lado alto del pozo, su factor de excentricidad es negativo $0 \geq \epsilon \geq -1$. La excentricidad del tubo de perforación puede afectar las caídas de presión en el espacio anular por reducción de las fuerzas friccionales de flujo del fluido. Un tubo de perforación perfectamente concéntrico en un espacio anular, presenta las máximas caídas de presión.

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

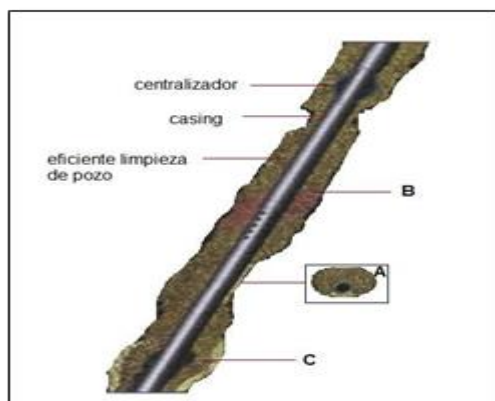
Este factor es de gran impacto en la limpieza de pozos, ya que es responsable en algunos casos de una alteración de hasta el 40% en las pérdidas de presión calculadas, hecho que podría provocar en algunos momentos un control inadecuado del pozo.

En los pozos verticales, es más fácil de lograr una sarta de perforación bien centrada, pero en los pozos desviados y de alto ángulo, ésta siempre tiende a recostarse al lado bajo del pozo perforado debido a la gravedad. Experimentos realizados por Walker mostraron que los sólidos son más difíciles de ser transportados cuando el tubo está situado cerca de la parte inferior del agujero, cuando esto sucede, las velocidades en los huecos estrechos próximos a la tubería son muy bajas generando que los sólidos se depositen rápidamente. Este efecto tiende a acentuarse si los aumentos de la viscosidad, como las fuerzas de arrastre en el líquido reducen la velocidad en el espacio más estrecho del hueco.

La figura 9 muestra los efectos de la excentricidad de la tubería en el movimiento de fluidos. El transporte de recorte es más eficiente en la zona B, donde el tubo está bien centrado, mientras que éste no es el caso en las zonas A y C, donde la tubería se encuentra en un lado.

Figura 9

Representación de la excentricidad de la tubería



Nota: Tomado de Estudio y simulación del efecto de la excentricidad de la tubería de perforación en pozos desviados en la limpieza de pozo (Hole clean). Aplicado a un campo combinado por Chaverra y Muegues (2014).

El transporte de recortes se ve afectado ligeramente por la posición de la tubería en el agujero, es decir hacia la cara del pozo en que se encuentre recostada. A medida que la inclinación del pozo incrementa hacia la horizontal, la cantidad de fluido necesaria para la efectiva limpieza del pozo tiende a aumentar.

1.1.6. Tamaño del hueco

Entre más grande sea el hueco o mayor sea la broca con las que se está perforando se van a necesitar mayores propiedades reológicas y mejor diseño hidráulico, que permitan acarrear todo el volumen de cortes o ripios que se estén generando en el pozo.

1.1.7. Angulo del pozo

A medida que aumenta el ángulo del pozo, la remoción de los recortes se hace más difícil. Para pozos con una desviación de 0 a 40 °, pozos verticales y casi verticales, generalmente los

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

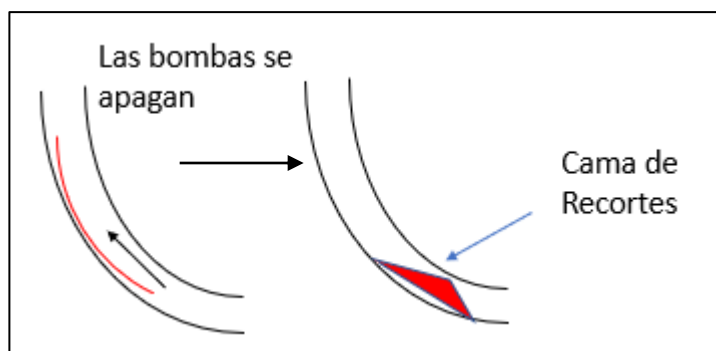
recortes son suspendidos por las propiedades reológicas del fluido debido a su fuerza cortante y las camas de recortes no llegan a formarse. En este caso la limpieza del pozo no es por lo general un problema, asumiendo que la reología del lodo es la adecuada. Ángulos de pozo por encima de 40° pueden producir la caída de los recortes, separándolos del canal de flujo y formando lechos de recortes. Ángulos de pozo de $40-60^\circ$ son los más difíciles de limpiar con efectividad. A estos ángulos, los lechos de recortes pueden deslizarse a caer en forma de avalancha hacia la parte baja del pozo, complicando su limpieza y pueden generar problemas como la pega de tubería.

Los mecanismos de remoción en pozos desviados se pueden clasificar según el ángulo de inclinación:

- **0° a 10° :** Debido a su poca inclinación son considerados como pozos verticales.
- **10° a 30° :** A velocidades menores de 120 ft/min, los recortes se depositan en el lado bajo del pozo y luego se deslizan, en secciones de mayor velocidad que serán llevados arriba del pozo, generalmente la capacidad de limpieza del lodo a este ángulo de inclinación no es tan eficiente como para un pozo vertical, sin embargo, es satisfactoria. Los recortes no forman la cama de los mismos en el lado bajo del pozo a velocidades anulares mayores de 120 ft/min, pero serán removidos del pozo a lo largo de la sección baja. Si las velocidades exceden los 180 ft/min, los recortes serán transportados suavemente a lo largo del pozo.
- **30° a 60° :** La limpieza del pozo es más crítica a estas inclinaciones, siendo las más complicadas entre 40° y 50° , puesto que la concentración de recortes es mayor, habitualmente a estas inclinaciones no solo es rápida la formación de una cama de recortes si no que estos se deslizan por la parte baja del pozo. Si las bombas están apagadas los recortes pueden empaquetarse alrededor de la sarta de perforación causando torque y arrastre excesivo provocando pega de tubería, como se presenta en la figura 10. Cuando el ángulo de inclinación es menor de 40° , los recortes caerán al fondo del pozo.

Figura 10

Cama de recortes presente al apagar la bomba



Nota: Tomado de Horizontal and Directional Drilling, por Carden, and GRACE (2007) 2007.

- **60° a 90°:** Por encima de una inclinación de 60°, el desarrollo de camas de recortes es instantáneo y su espesor es controlado por la velocidad anular. En algunas velocidades anulares bajas, el volumen de recortes en el pozo se reduce. Por encima de 60°, los recortes no se deslizan hacia abajo del pozo lo que reduce el volumen total en esta sección del pozo. A medida que aumenta la velocidad anular, el fluido de perforación erosionará más rápido la cama de recortes.

En la tabla 1 se presentan los parámetros críticos de acuerdo al ángulo de desviación y como inciden en mejorar la limpieza del pozo.

Tabla 1

Parámetros críticos de limpieza en pozos desviados

Ángulo de desviación	Parámetros críticos (en orden de importancia)	Mejorar la limpieza del pozo
Zona 0° a 35°	1. Tasa de flujo/velocidad anular	Incrementar
	2. Reología (YP, K)	Incrementar

	3. ROP	disminuir
	1. Tasa de flujo/velocidad anular	Incrementar
Zona 35° a 65°	2. Tasa de rotación de la sarta	Incrementar
	3. Reología (RPM, PV)	Aplanar el perfil
	4. ROP	Disminuir
	1. Tamaño del portador PDC	Disminuir
	4. Tasa de flujo/velocidad anular	Incrementar
Zona >65°	5. Tasa de rotación de la sarta	Incrementar
	2. Reología (RPM, PV)	Aplanar el perfil
	3. ROP	Disminuir

Fuente: **ELSEVIER**, Drilling Fluids Processing Handbook, 2011

1.1.8. Velocidad de perforación (ROP)

La velocidad con la que la barrena puede romper la roca que se encuentra por debajo de la misma y de ese modo profundizar pozo. Esta velocidad se indica habitualmente en unidades de pies y/o metros por hora. Prevenir los recortes en los pozos es mucho más fácil que eliminarlos. Controlar la velocidad de penetración instantáneo es una forma de evitar sobrecargar el anular con recortes. Esta velocidad, siempre debe controlarse para que el fluido tenga el tiempo suficiente para eliminar los cortes intactos del fondo del orificio y minimizar el aumento de la densidad del fluido en el anular. El tratamiento para la limpieza deficiente del hoyo es reducir la ROP, hacer circular el pozo y tomar medidas para optimizar la limpieza del mismo.

Un aumento en la velocidad de penetración resultará en una mayor concentración de recortes en el anular. A ángulos de pozo por debajo de 40° la velocidad de transporte crítica y los requerimientos de flujo crítico para limpiar aumentan con el aumento de la velocidad de

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

penetración, asumiendo que no hay cambios en la viscosidad efectiva del lodo. En pozos desviados con ángulo por encima de 40° , una velocidad de flujo subcrítica y un aumento en la velocidad de perforación van a permitir que el lecho de recortes crezca más, debido a la mayor velocidad de generación de recortes.

La tasa de penetración (ROP) es un parámetro considerable a la hora de diseñar un proyecto de perforación. Una (ROP) alta generaría más cortes, lo que da como resultado la necesidad de una eliminación de sólidos efectiva. (Mohammad y Malekzadeh, 2012). El aumento de la (ROP) a un caudal constante da como resultado un aumento en la concentración de los recortes. Por lo tanto, el caudal debe aumentarse junto con la (ROP) para compensar el aumento en la generación de recortes, sin embargo, el aumento del caudal no compensa totalmente el efecto de una mayor penetración (Bilgesu et al., 2007). El efecto de la velocidad de penetración en la limpieza del pozo es obvio si se mantienen constantes otros parámetros. En presencia de rotación de la tubería, el aumento de la (ROP) tiene menos impacto en la limpieza del pozo en comparación con el caso sin rotación de la tubería. Además, la (ROP) está muy relacionada con el caudal de fluido, así, una alta tasa de penetración requiere una mayor tasa de flujo para minimizar el efecto de una mayor generación de cortes (Heydari et al., 2017).

De los gráficos de velocidad de perforación contra caudal de flujo (figuras 16, 17 y 18) se puede observar que la relación entre el (ROP) y el (CFR) es aproximadamente lineal. También se aprecia que, para un (ROP) dado, aumentar el Índice de Transporte (TI) reducirá el (CFR) y, por lo tanto, mejoran la limpieza del pozo. A un caudal de lodo máximo dado, como suele ser el caso cuando se perfora un pozo desviado, el aumento de (TI) aumentará la (ROP) máxima permitida en la cual el pozo puede perforarse de manera segura. Por lo tanto, los gráficos de

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

(ROP) se pueden utilizar como una herramienta útil para optimizar la limpieza del pozo y, al mismo tiempo, maximizar la eficiencia de la perforación.

1.2.Velocidad anular (V_{ann})

La velocidad con la cual el fluido de perforación o el cemento se desplaza en el espacio anular. Es importante monitorear la velocidad anular para garantizar la eliminación de recortes, desmoronamientos y otros detritos del pozo, a la vez que se evita la erosión de su pared. La velocidad anular se expresa generalmente en unidades de pies por minuto, o con menos frecuencia, metros por minuto. El término difiere de flujo volumétrico. Como una guía aproximada, la velocidad anular requerida para la limpieza de pozos desviados con 50-60° es aproximadamente el doble de la necesaria para pozos verticales.

1.3.Velocidad de deslizamiento (V_s)

Cuando una partícula cae a través de un fluido estático o en reposo de volumen infinito (para evitar efectos de pared), la partícula finalmente alcanza su velocidad máxima y final llamada su "Velocidad de sedimentación terminal." También se le suele llamar la velocidad de deslizamiento, v_s , ya que es la velocidad a la que la partícula cae (se desliza) en relación con el resto del fluido.

1.4. Geología de la formación

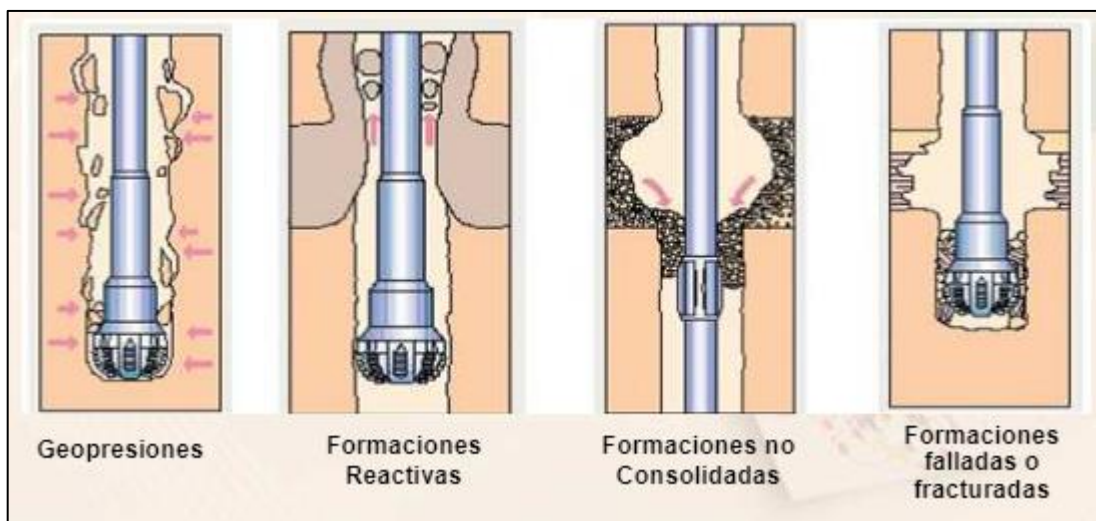
La perforación en zonas geológicas complicadas, como fallas, juntas, fracturas, formaciones estratificadas, planos de estratificación débiles, normalmente causa problemas de inestabilidad en la sección del pozo. Por lo tanto, Los problemas de inestabilidad de la sección del agujero

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

pueden deberse al efecto de influencias mecánicas y químicas o una combinación de ellas. El efecto mecánico normalmente es causado por la densidad del lodo (demasiado alta o demasiado baja) y los parámetros del lodo de perforación o malas prácticas de perforación como (tasa de penetración, influencia de la vibración, torque y arrastre, y no realizar “wiper trips” si la sección del pozo lo dicta). Por otro lado, el efecto químico es atribuido al tipo de lodo de perforación, como un fluido de perforación inadecuado o concentraciones inadecuadas de inhibidores añadidos para manejar la formación esperada que se perfora como la formación de lutitas. La figura 11 muestra la tendencia de caída y acumulación de recortes frente a diferentes dificultades geomecánicas que se pueden presentar durante la perforación del pozo, como zonas poco consolidadas, fracturas o formaciones con problemas de geo-presión.

Figura 11

Tendencia de caída de recortes vs carácter de la formación



Nota: Tomado de Automated Evaluation of Hole Cleaning Efficiency While Drilling Improves Rate of Penetration, por Mohamed, et. Al. (2020)

Estos problemas geo-mecánicos en el pozo hacen que aumente el volumen de recortes en el espacio anular, lo que causa un incremento en la presión de circulación y problemas de empaquetamiento. En muchas ocasiones se debe suspender la perforación mientras se mejora la limpieza en el pozo.

1.5.Comparación de limpieza en huecos verticales y desviados

Cuando se diseña un plan de perforación, la limpieza de pozos se analiza de manera diferente en pozos verticales y pozos desviados, incluidos los pozos horizontales, sin embargo, el diseñador del pozo debe tener en cuenta que todos los pozos desviados incluyen una sección vertical. Por lo tanto, el plan de perforación de todos los pozos debe considerar la limpieza en pozos verticales.

Una de las principales fuerzas que dificulta la limpieza del hueco es la gravedad, la cual, se opone naturalmente al transporte de los recortes perforados de varias formas. En pozos verticales actúa directamente opuesto al movimiento de los recortes desde el fondo del pozo hasta la superficie, en pozos horizontales actúa perpendicular al movimiento, mientras que en pozos inclinados actúa en ángulo. En el caso de los dos últimos, la gravedad puede mover rápidamente el corte desde la zona de flujo anular hacia el lado bajo del agujero donde la velocidad del lodo es cero. Esto significa que una vez que el corte descansa en el lado bajo del pozo, es extremadamente difícil volver a introducirlo en la corriente de flujo en movimiento sin una acción mecánica adicional como la rotación de la sarta de perforación.

De manera general, la limpieza del pozo se puede describir en tres rangos. Primero están los pozos verticales y casi verticales (0 a 30° grados de inclinación), donde la velocidad de sedimentación o deslizamiento de recortes determina el transporte de partículas. En segundo lugar, están los ángulos intermedios, (30° a 60°), aquí el transporte de los recortes del lecho móvil se puede formar mediante un mecanismo de elevación; mientras que en el tercer rango de ángulos de inclinación elevados (>60°), el transporte depende de un mecanismo de acción rodante.

1.5.1. Análisis de la limpieza en huecos verticales

Un método para analizar la limpieza en pozos verticales es a través de la relación de transporte (TR). Esta es una relación entre la velocidad de deslizamiento y la velocidad anular y se puede utilizar para describir la eficiencia de limpieza del pozo. Cualquier cosa que aumente la relación de transporte aumentará la eficiencia de la limpieza del hueco.

$$TR\% = \left(1 - \frac{V_s}{V_{ann}}\right) * 100$$

Donde,

TR= Relación de transporte, %

V_s= Velocidad de deslizamiento de los sólidos perforados, ft/min

V_{ann} = Velocidad anular, ft/min

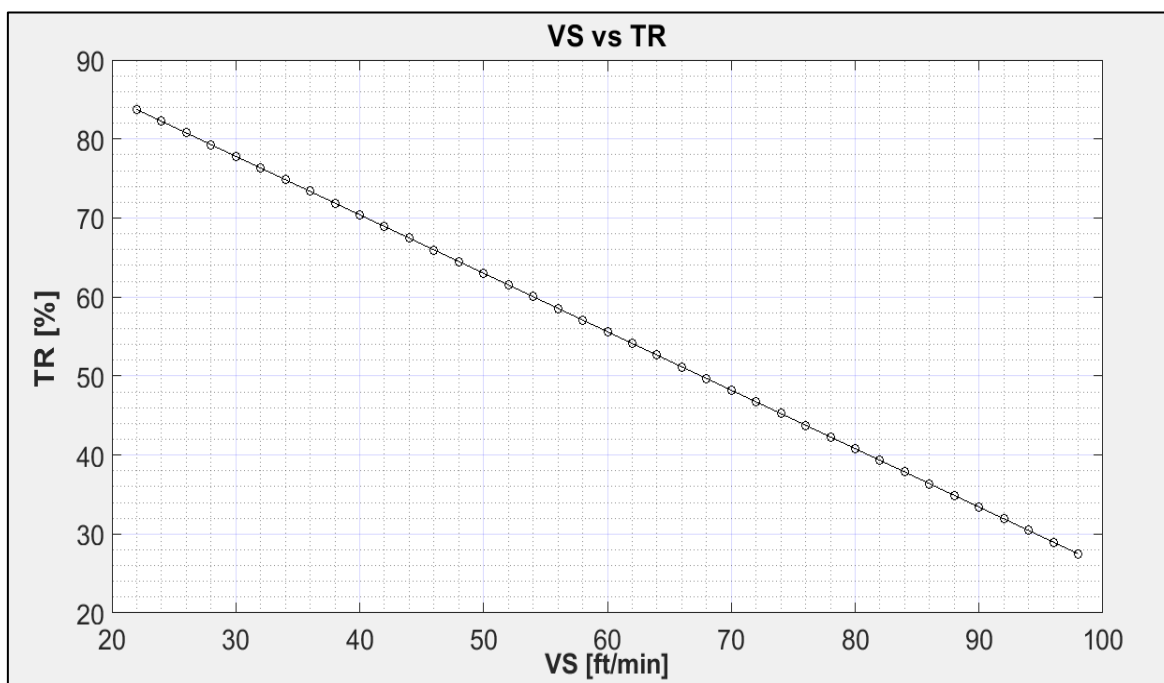
La velocidad de deslizamiento está influenciada por el tamaño, la densidad y la forma de los

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

recortes de perforación. Además, también se ve afectado por la reología, la densidad y la velocidad del lodo. Cuanto más grande y pesado sea el corte, y cuanto más ligero y menos viscoso sea el fluido, más rápido se deslizará el corte a través del lodo. En la figura 12 se observa la relación entre la velocidad de deslizamiento y la relación de transporte.

Figura 12

Velocidad de deslizamiento vs Relación de transporte



Nota: Mohamed, et. Al. (2020). Modificada por el autor.

“Al comparar la velocidad de deslizamiento (V_s) con la velocidad anular (V_a) en un intervalo, es posible calcular el tiempo neto de transporte de partículas (NPT) y el tiempo anular de transporte (ATT). Estos valores le indicarán al ingeniero el tiempo mínimo requerido para el transporte de un recorte hasta la superficie.” (Reyes, 2014).

Como regla general para los ingenieros de fluidos de perforación, la velocidad anular del lodo debe ser 1,2 veces mayor que la velocidad de asentamiento para garantizar un movimiento

mínimo de los recortes en el espacio anular. El tamaño, la forma y el peso de los recortes de perforación generados conducen a controlar su velocidad de deslizamiento a través del fluido de perforación en circulación. La baja tasa de cizallamiento puede afectar significativamente la capacidad de transporte de lodo en el pozo. El lodo de perforación debe tener la capacidad de transporte adecuada para transportar los recortes de perforación generados desde el pozo.

1.5.2. Análisis de la limpieza en huecos desviados y horizontales

Los pozos horizontales proporcionan un área de alto drenaje dentro de los yacimientos. Los avances en las tecnologías de perforación horizontal se utilizan para desarrollar recursos no convencionales como el shale gas y el metano de capas de carbón. Sin embargo, la inestabilidad del pozo y las dificultades en la limpieza del pozo se combinan con condiciones de alta temperatura y alta presión en estas formaciones sensibles. Los principales desafíos en la perforación de pozos horizontales son la estabilidad del pozo y la remoción de cortes (Lake et al., 2006).

La estabilidad del pozo depende de las interacciones físicas y químicas entre la formación y el lodo. La estabilidad física se vuelve crítica en la sección horizontal. El pozo soporta tensiones verticales en contraste con las tensiones horizontales en pozos verticales. En consecuencia, se necesita lodo pesado para evitar que el pozo se derrumbe. la limpieza deficiente del pozo es el problema más común, que ocurre principalmente en la sección desviada y horizontal de los pozos de petróleo y gas (Xiaofeng, 2013). La limpieza ineficiente del pozo afecta la tasa de penetración y, en consecuencia, causa pérdida de fluido, pérdida de circulación y tubería

atascada. Además, el bloqueo gradual del orificio podría crear fracturas y causar pérdida de circulación durante la operación de disparo (Li y Walker, 2001). Además, las dificultades en otras operaciones, como trabajos de revestimiento y cementación. Resolver estos problemas no solo es muy costoso, sino que también aumenta significativamente el tiempo no productivo (NPT).

Gráficos Para Evaluar La Limpieza De Pozos Desviados Y Horizontales

Para evaluar el proceso de limpieza en pozos desviados y horizontales Yuejio (1994) planteó un modelo de limpieza a partir de gráficos, los cuales determinan si la limpieza es eficiente o no, basado en la configuración de los parámetros de perforación que más influyen en la limpieza de ripios como el factor reológico, el factor de ángulo y el índice de transporte.

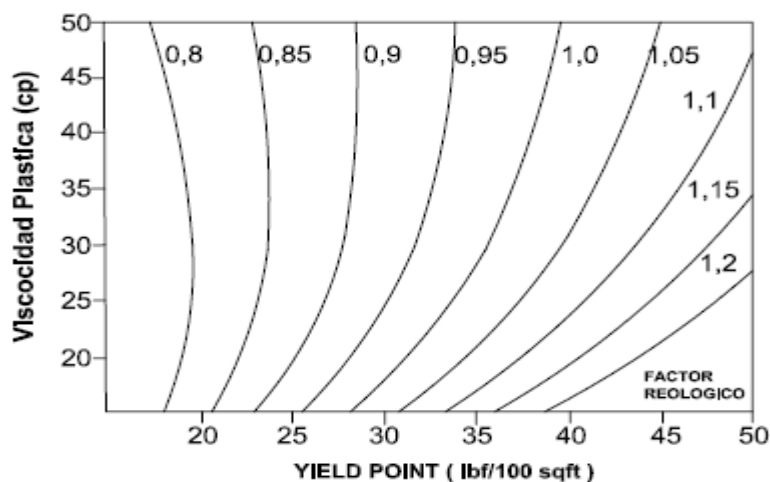
1.5.2.1. Factor reológico (RF)

Para describir las propiedades reológicas del lodo en el modelo de limpieza de pozo que se desea plantear, se usan las propiedades de viscosidad plástica (VP) y límite elástico (YP), esto se basa en la consideración de que (PV) y (YP) son los parámetros más simples y más utilizados para describir este parámetro y también son más fáciles de controlar en sitio.

Un solo parámetro llamado factor reológico (RF) se puede utilizar para describir los efectos de (PV) y (YP). Cuanto mayor sea el (RF), más eficaz será la reología del lodo para la limpieza de huecos. Con las figuras 13, 14 y 15 se determina el valor de (RF) a partir del (PV) y (YP) del lodo para tamaño de pozos de 17-1/2", 12-1/4" y 8-1/2" respectivamente.

Figura 13

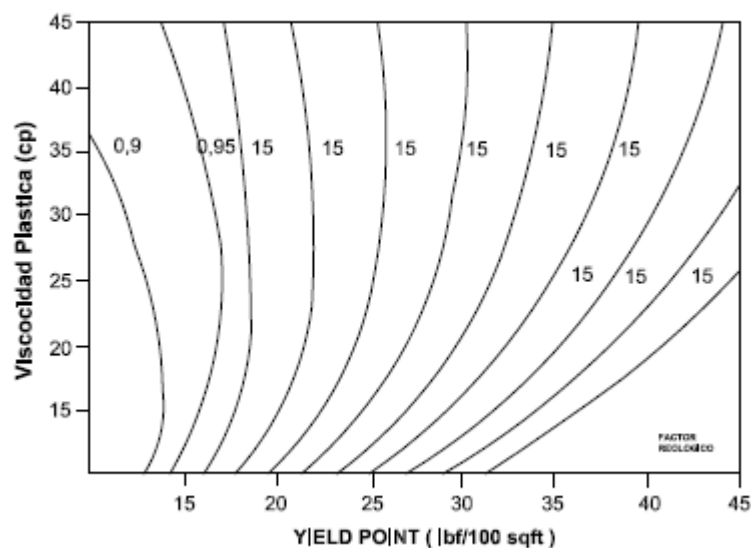
Factor reológico para pozos desviados de 17-1/2”.



Nota: Yuejin (1994). Adaptado de Simple Charts To Determine Hole Cleaning Requirements in Deviated Wells

Figura 14

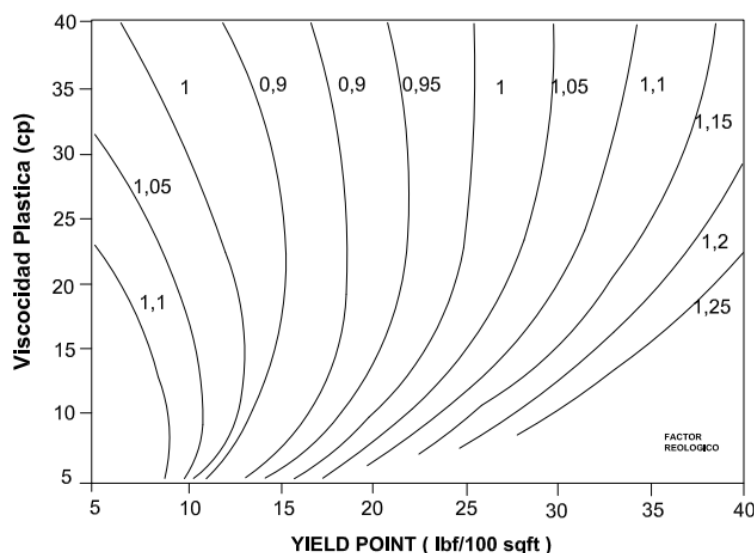
Factor reológico para pozos desviados de 12-1/4”.



Nota: Yuejin (1994). Adaptado de Simple Charts To Determine Hole Cleaning Requirements

Figura 15

Factor reológico para pozos desviados de 8-1/2



Nota: Yuejin (1994). Adaptado de Simple Charts To Determine Hole Cleaning Requirements

El factor de reología (RF) es una indicación directa de cuán efectiva es la reología del lodo en términos de limpieza de pozos, cuanto mayor es el RF, más efectiva es la reología del lodo y mejor es la limpieza del pozo. Por lo tanto, los gráficos de RF se pueden utilizar como una herramienta útil para optimizar la reología del lodo. En los gráficos de RF (Figuras 13,14 y 15), también se puede observar que el valor de RF es más sensible al cambio de yield point que de viscosidad plástica, esto indica que el yield point tiene un efecto mayor en la limpieza de pozos desviados.

1.5.2.2.Factor de ángulo (AF)

El efecto del ángulo del agujero fue aproximado por un grupo de factores denominados Factor de ángulo (AF) que se muestran en la Tabla 2. Cuanto mayor sea el ángulo del agujero, menor será el valor de AF, más difícil será la limpieza del agujero.

Tabla 2*Factor de ángulo para pozos desviados.*

Angulo del pozo	Factor de ángulo (AF)
25°	1,51
30°	1,39
35°	1,31
40°	1,24
45°	1,18
50°	1,14
55°	1,10
60°	1,07
65°	1,05
70°-80°	1,02
80°-90°	1

Nota: Yuejin (1994). Adaptado de Simple Charts To Determine Hole Cleaning Requirements

1.5.2.3. Índice de transporte (TI)

El efecto del peso del lodo (MW) se combinó junto con el factor reológico (RF) y el factor de ángulo (AF) para formar un único parámetro llamado índice de transporte (TI).

$$TI = RF \times AF \times MW$$

donde MW está medido en SG o g / cm³, el (RF) y (AF) se obtienen de las Figuras 13,14,15 y la Tabla 2 y pueden considerarse adimensionales. Se puede ver que, en un conjunto dado de condiciones de perforación (tamaño del pozo, ángulo, peso del lodo y (PV) e (YP) del lodo), (TI) es una indicación directa de la condición de limpieza del pozo al perforarlo. Cuanto más alto sea

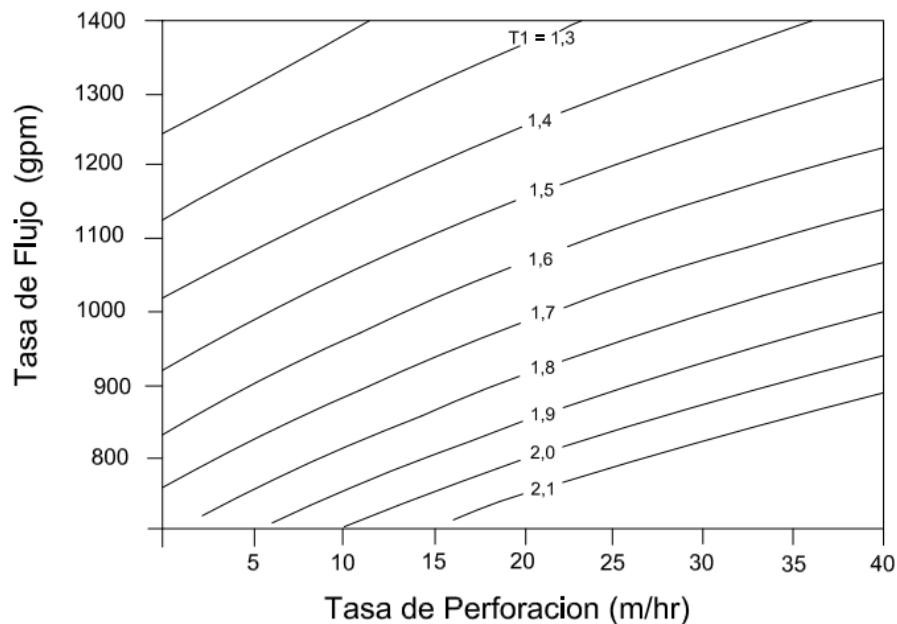
IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

el (TI), mayor será la limpieza del pozo, y viceversa.

Las restantes variables controlables son la (ROP) y el caudal crítico (CFR). La interacción entre la (ROP) y el (CFR) se representan en un gráfico, pero se debe establecer un vínculo con el (TI) para reflejar los efectos de todas las demás variables. Con Las figuras 16,17,18 se determinan estas interacciones para tamaño de pozos de 17-1/2", 12-1/4" y 8-1/2" respectivamente.

Figura 16

Relación ROP y caudal crítico para pozos desviados de 17-1/2".

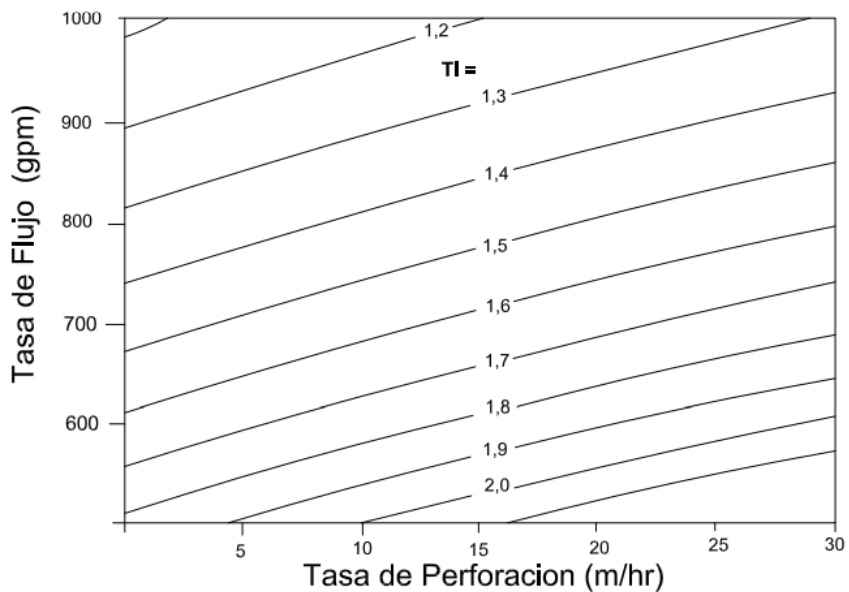


Nota: Yuejin (1994). Adaptado de Simple Charts To Determine Hole Cleaning Requirements

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

Figura 17

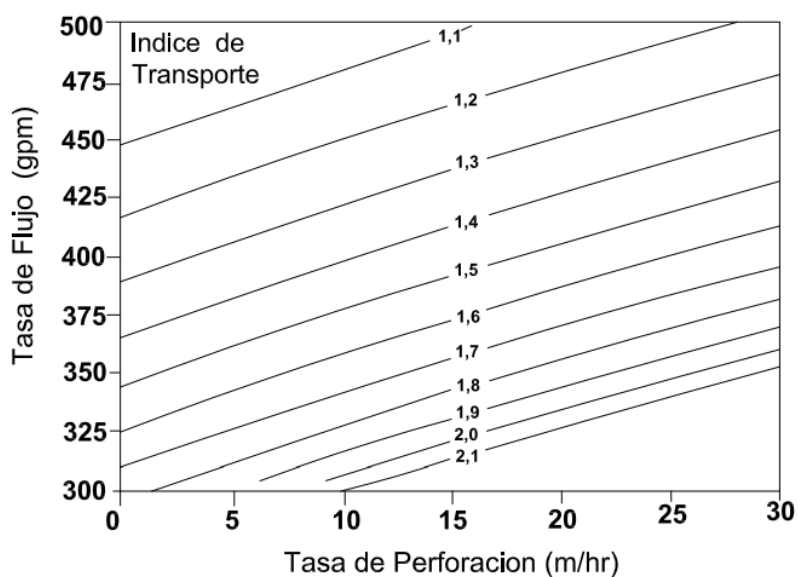
Relación ROP y caudal crítico para pozos desviados de 12-1/4”.



Nota: Yuejin (1994). Adaptado de Simple Charts To Determine Hole Cleaning Requirements

Figura 18

Relación ROP y caudal crítico para pozos desviados de 8-1/2”.



Nota: Yuejin (1994). Adaptado de Simple Charts To Determine Hole Cleaning Requirements

1.5.2.4. Caso Práctico Para Determinar La Máxima ROP Permissible

Para ilustrar el método de evaluación de limpieza de hueco en pozos desviados se presenta el siguiente ejemplo:

Suponga que se perfora un pozo horizontal de 8-1/2” con un lodo de 12 LPG, viscosidad plástica (VP) de 25 cP y un yield point (YP) de 18 lbf/100 ft², además las bombas de lodo pueden entregar un máximo de 450 GPM.

Para determinar la máxima velocidad de perforación se deben seguir los siguientes pasos:

1. Obtener el factor reológico (FR), ingresando en el gráfico de factor de reología apropiado (Figuras 13,14 o 15) de acuerdo con el tamaño del pozo, y los valores de VP y YP.

En este caso el factor reológico (RF) es de 0,91.

2. Leer de la tabla 2 el factor de ángulo (AF) de acuerdo con el ángulo de inclinación del pozo.

Para pozos horizontales el (AF)=1.0

3. Calcular el índice de transporte (TI) con el peso del lodo (MW) y los parámetros (AF) y (RF)

$$TI = RF \times AF \times MW$$

$$TI = 0,91 \times 1,0 \times 1,45 = 1,32$$

4. Determinar la máxima ROP permissible, ingresando en el grafico apropiado (Figuras

16,17 o 18) de acuerdo con el tamaño del pozo, el caudal de bombeo y el índice de transporte (TI).

Si el caudal máximo entregado es de 450 GPM, la ROP máxima que se puede perforar sin causar problemas de limpieza de pozo es de aproximadamente 23 m/hr (75 ft/hr).

2. Modelos De La Limpieza De Pozo

2.1. Problemas Operacionales Por Mala Limpieza Del Pozo

Cuando no se planea y desarrolla un modelo de limpieza de pozo durante la perforación del mismo, que garantice un adecuado transporte de los recortes generados desde el fondo hasta superficie, se hacen presentes ciertos problemas operacionales que pueden conducir al fracaso de la operación y la pérdida del pozo, estos son algunos de los problemas más relevantes, causados por una mala operación de limpieza.

- **Pega de tubería**

La acumulación excesiva de recortes de perforación en el espacio anular causada por una limpieza inadecuada del pozo puede conllevar a la pega mecánica de la tubería, particularmente en la perforación de pozos direccionales. El asentamiento de una gran cantidad de cortes de perforación suspendidos en el fondo cuando se apaga la bomba, o el deslizamiento hacia abajo de los mismos, en el lado inferior de un pozo direccional puede causar atascamiento o pega de tubería. En la perforación direccional de pozos, se puede formar un lecho de cortes estacionarios en el lado bajo del pozo. Si esta condición existe mientras se perfora, es muy probable que se produzca un atascamiento de la tubería. Es por eso que es una práctica de campo común circular de abajo hacia arriba varias veces con la broca fuera del fondo para eliminar cualquier lecho de

esquejes que pueda estar presente antes de hacer un viaje. Los aumentos en el torque y/o arrastre, y algunas veces en la presión de la tubería de perforación en circulación, son indicios de grandes acumulaciones de cortes en el anular y de posibles problemas de atascamiento de la tubería.

- **Embotamiento y desgaste prematuro de la broca**

El embotamiento es una condición en la cual pueden salir distintos componentes de las herramientas de fondo a superficie por problemas del fluido de perforación y/o problemas estructurales del pozo, donde se genera un recubrimiento de generalmente arcilla por la parte externa de las herramientas. El paso del fluido de perforación a través de la broca, representa la caída de presión más importante del sistema hidráulico, y tiene como función limpiar los cortes para evitar el embotamiento de la broca.

Cuando los cortes de perforación en el fondo del pozo no son eliminados correctamente, se presentan problemas de desgaste prematuro de la broca, ya que ésta sigue trabajando sobre material que ya fue perforado, impidiendo el avance en profundidad.

- **Inestabilidad del hueco**

La inestabilidad de un pozo se da en el agujero perforado e inestable que tiende a derrumbarse o colapsarse. Las formaciones no consolidadas, las formaciones fracturadas y las lutitas sometidas a esfuerzos químicos o mecánicos, son formaciones inestables que pueden llegar a derrumbarse (Mitchell J., 2001).

Los problemas de estabilidad de pozo ocurren cuando los esfuerzos cercanos al agujero exceden las resistencias de la roca, para prevenir el problema debe haber un balance entre los

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

esfuerzos y la resistencia, lo cual debe mantenerse durante la perforación, por medio de la adecuada formulación de lodos de perforación, densidad del lodo, y en general una óptima limpieza del pozo.

Las causas que contribuyen a la inestabilidad de un pozo durante la perforación son:

- Densidad del lodo perforación.
 - Resistencia de la roca.
 - Fluctuaciones de temperatura.
 - Regímenes de esfuerzos en sitio y anisotropía de esfuerzos.
 - Planos de estratificación en lutitas.
 - Invasión por filtrado del fluido de perforación.
 - Limpieza del pozo.
 - Vibración de la sarta de perforación.
 - Geometría del agujero.
-
- **Formación de fracturas en la formación**

Un inadecuado transporte de los recortes de perforación a superficie, hace que estos se queden atascados en el anular. Si el fluido de perforación sigue circulando con estos problemas, creará un incremento en las pérdidas de presión en el anular, aumentando el ECD a tal punto que puede superar el valor de presión de fractura, comprometiendo la estabilidad del pozo.

- **Excesivo torque y arrastre de la sarta de perforación**

Cuando existe reducción en el espacio anular causado por el atascamiento de los cortes de perforación que no son llevados a superficie se presenta excesivo torque y arrastre de la sarta de perforación, causando desgastes prematuros, pega de tubería y problemas de excentricidad. Este es el problema más frecuente, que a menudo conduce a la incapacidad de alcanzar el objetivo en la perforación de alto ángulo o alcance extendido

- **Reducción en la tasa de perforación**

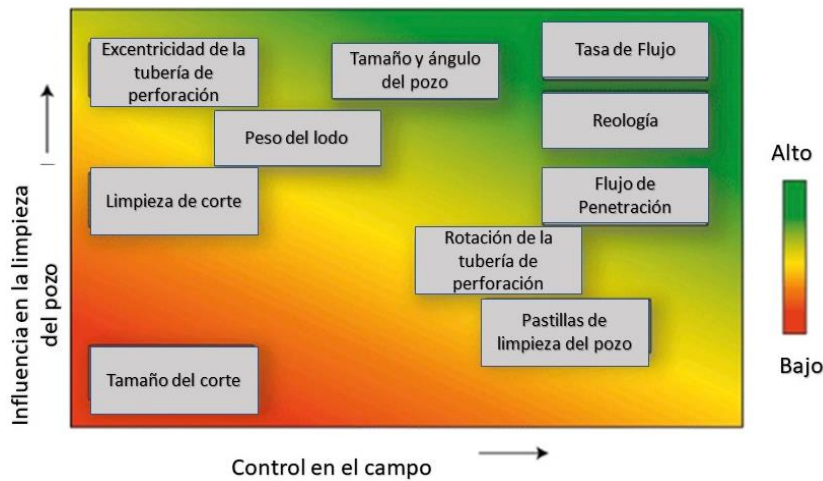
Este un problema operacional causado por la inadecuada limpieza de los cortes de perforación que impiden que la broca pueda avanzar en profundidad además de limitaciones en el movimiento de la tubería debido a una reducción en el espacio anular. En muchos casos, cuando los problemas por limpieza son severos, los ingenieros de perforación deciden reducir la velocidad de avance como una medida de alivio al problema

2.2. Indicadores De Limpieza De Hueco

Como se describió en el primer capítulo, el transporte de recortes está influenciado por diversos parámetros y la variación de cada uno de ellos tiene su propio impacto en la limpieza del pozo. Hay distintas variables a controlar y modificar para optimizar el proceso de limpieza. Sin embargo, el efecto de cada parámetro difiere si el pozo es vertical, inclinado u horizontal. La figura 19 ilustra los parámetros fundamentales que afectan la limpieza del pozo. Las variables se basan en su influencia en la limpieza del pozo y su capacidad de control en el campo.

Figura 19

Factores que afectan el transporte de recortes.



Nota: Husameldin (2020). Adaptado de Hole cleaning and drilling fluid sweeps in horizontal and deviated wells: Comprehensive review.

Entre las variables, algunas pueden diseñarse durante la planificación y / o controlarse durante la perforación, mientras que otras no pueden diseñarse ni controlarse. Las primeras se denominan variables controlables que incluyen:

1. Caudal de lodo.
2. Tasa de penetración (ROP).
3. Reología del lodo.
4. Régimen de flujo de lodo.
5. Peso del lodo.
6. Ángulo del pozo.
7. Tamaño del pozo.

El último grupo se llama las variables incontrolables que Incluyen:

1. Excentricidad de la tubería de perforación
2. Densidad de los ripios
3. Tamaño de los ripios

Las variables controlables enumeradas anteriormente se pueden categorizar aún más considerando si se pueden ajustar fácilmente o no en sitio para combatir el problema de limpieza del pozo. Las variables ajustables se consideran las más importantes y estas incluyen: el caudal, la velocidad de perforación, reología del lodo y régimen de flujo. Las variables controlables restantes normalmente son fijas porque están dictadas por otras consideraciones de perforación.

2.2.1. Hidráulica de perforación y parámetros de limpieza

La hidráulica de perforación se refiere a la operación donde el fluido se utiliza para transferir presión desde la superficie a la broca y la caída de presión a través de la misma; se usa para mejorar la tasa de penetración, parte de la energía del fluido también se gasta al limpiar el área que está por delante de la broca de los ripios generados, evitando la aglomeración de los mismos en el cuerpo y cara de la broca.

El objetivo del análisis hidráulico es evaluar los efectos de la viscosidad del fluido de perforación en ciertos parámetros críticos. Los siguientes parámetros se evalúan en el análisis:

- I. Determinación de las pérdidas de presión anular para establecer la densidad equivalente de circulación (EDC). La ECD es importante para evitar la pérdida de circulación y proteger la integridad de la zapata de la tubería de revestimiento.
- II. Evaluación de los efectos de los cambios del fluido sobre el desempeño hidráulico del sistema.
- III. Optimización de la hidráulica para un mejor desempeño de la perforación (por ejemplo, una mayor tasa de penetración).
- IV. Asegurar una buena limpieza del pozo (transporte de recortes y su concentración en el anular).

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

- V. Evitar la erosión del pozo debido al flujo turbulento en el anular
- VI. Evitar la inestabilidad del pozo y problemas para el control de la presión, debido a que se está sacando la tubería demasiado rápidamente (succión).
- VII. Evitar la pérdida de circulación al correr la tubería en el pozo demasiado rápidamente (surgencia).

La reología y la hidráulica son estudios del comportamiento del fluido que están relacionados entre sí; la hidráulica describe la manera en que el flujo de fluidos crea y utiliza las presiones; en los fluidos de perforación, el comportamiento de flujo del fluido debe ser descrito usando modelos reológicos y ecuaciones, antes de poder aplicar las ecuaciones de hidráulica.

2.2.2. Pérdida de presión en el anular

La presión necesaria para hacer circular el fluido de perforación en un sistema hidráulico, es la correspondiente a las pérdidas de presión por fricción que tienen lugar dentro del sistema. Estas son las ecuaciones empleadas para calcular las pérdidas de presión en el anular:

Determinar la velocidad de flujo en el espacio anular (ft/seg):

$$V_a = \frac{0,408Q}{d_h^2 - d_p^2}$$

Donde,

Q= tasa de flujo, [GPM]

dh= Diámetro del hueco, [in]

dp= Diámetro externo de la tubería, [in]

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

Determinar el valor n para flujo en el espacio anular:

$$n = 3,32 * \log \frac{\Theta 600}{\Theta 300}$$

Donde,

n= Índice de comportamiento de flujo

Θ300= Lectura a 300 rpm

Θ600= Lectura a 600 rpm

Determinar el valor k en el espacio anular:

$$K = 511^{(1-n)} * \Theta 300$$

Donde,

K= Índice de consistencia, cP

n= Índice de comportamiento de flujo

Θ300= Lectura viscosímetro a 300 rpm

Determinar la viscosidad eficiente en el espacio anular (cP):

$$\mu_{ea} = 100(K) \left[\frac{144(Va)}{D_h - D_p} \right]^{n-1}$$

Después de obtener la viscosidad eficiente del fluido sometido al espacio anular, se continúa determinando el número de Reynolds y sus límites para saber si se trata de un flujo turbulento o laminar, cabe mencionar que como el fluido va en contra de la gravedad y ya no es bombeado a la misma eficiencia es de esperar flujos laminares desde la barrena hasta la superficie en el recorrido de regreso del fluido.

Determinar el número de Reynolds:

$$Re = \frac{928(Va)(D_h - D_p)(MW)}{(\mu_{ea}) \left[\frac{2n + 1}{3n} \right]^n}$$

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

Determinar el número de Reynolds para cambio de flujo laminar:

$$Re_L = 3470 - 1370(n)$$

Determinar el número de Reynolds para cambio de flujo turbulento:

$$Re_T = 4270 - 1370(n)$$

Determinar el tipo de flujo y el factor de fricción:

$$f_a = \frac{24}{Re}$$

Sí $Re > Re_T$ calcular el factor de fricción para flujo turbulento:

$$f_a = \frac{\left(\frac{\log(n) + 3,93}{50}\right)}{Re^{\frac{1,75 - \log(n)}{7}}}$$

Sí $Re_L < Re < Re_T$ calcular el factor de fricción para flujo transicional:

$$f_a = \left(\frac{Re - Re_L}{800}\right) \frac{\left(\frac{\log(n) + 3,93}{50}\right)}{Re^{\frac{1,75 - \log(n)}{7}}} + \frac{24}{Re_L}$$

Determinar la pérdida de presión para el intervalo (psi):

$$\Delta P_{pl} = \frac{(f_a)(Va^2)(MW)}{25,8(D_h - D_p)} * L$$

Determinar la pérdida de presión total en el espacio anular (psi):

$$P_{aT} = \sum \Delta P_{pl}$$

2.2.3. Densidad equivalente de circulación (ECD)

“Es la presión adicional generada por las pérdidas de presión anular (APL) desde un punto determinado hasta superficie, más la presión hidrostática del fluido existente, pero expresada como peso de lodo (lb/gal).” (De la Torre, Ramos, Ramos Rodríguez, & Jimenes y Galván, 2017). “Es la densidad efectiva ejercida por un fluido en circulación contra la formación que tiene en cuenta la caída de presión en el espacio anular.” (De la Torre Ramos, 2017).

Puede calcularse de la siguiente manera:

$$ECD(ppg) = \frac{APL(psi)}{0,052 \times TVD(ft)} + MW(ppg)$$

Las propiedades reológicas del fluido de perforación constituyen una parte importante de la ECD. A medida que la viscosidad del fluido incrementa, la pérdida de presión aumenta, provocando un aumento en la ECD. Una ECD aumentada puede ser suficiente para iniciar una fractura en la formación o propagar una fractura existente.

2.2.4. Volumen y concentración de ripios

Mientras se está perforando se generan recortes por cada pie de avance en el hueco, cuando se perfora la primera sección de un pozo desde la superficie hasta la profundidad de asentamiento del revestimiento conductor, se obtienen la mayor cantidad de recortes, ya que esta es la etapa donde tiene un mayor diámetro del hueco, por lo cual tiene un mayor volumen de sólidos. Así pues, conocer la cantidad estimada de cortes que se van a generar durante la perforación es importante para poder diseñar el programa de limpieza del pozo.

Con ciertos cálculos se puede dar un aproximado del volumen de sólidos que serán generados en la perforación del pozo en cada etapa. El volumen generado de recortes no es igual al volumen del hueco, generalmente es 2 o 3 veces mayor al volumen teórico del pozo. Esto debido a varios factores como “washouts”, humectabilidad y el factor de expansión de la roca. Un método práctico para calcular el volumen total de sólidos extraídos es realizar un promedio entre el diámetro teórico del hueco y el diámetro máximo obtenido por el registro caliper para un determinado tramo de la perforación.

También existen fórmulas para realizar el cálculo del volumen de sólidos generados:

$$V_{\text{ripios}} = \frac{Dh^2}{1029,4} * H * (1 - \phi)$$

Dónde:

Dh: Diámetro promedio del hueco, [in]

H: Profundidad, [ft]

ϕ : Porosidad, [fracción]

Vripios: Volumen de ripios de perforación, [Bb]

2.3. Análisis de indicadores de limpieza

El conocimiento del tamaño de los recortes, el tamaño del anular, el patrón de flujo y las propiedades del fluido en el fondo del pozo no se puede determinar con un alto nivel de precisión utilizando indicadores de limpieza del pozo, como la relación de transporte, la relación de limpieza del pozo o el índice de transporte. La concentración de recortes en el espacio anular (CCA) por sí sola no puede revelar las propiedades del lodo de perforación, mientras que la

aplicación del índice de capacidad de carga (CCI) por sí sola no ayudará a optimizar la ROP hasta el límite deseado, pero el análisis y monitoreo simultáneo de los dos indicadores de limpieza si pueden garantizar un avance óptimo en la perforación del pozo sin comprometer la estabilidad del mismo debido a una mala limpieza de hueco.

2.3.1. Índice de capacidad de carga (CCI)

El conocimiento del tamaño de los recortes, el tamaño del espacio anular, el patrón de flujo y las propiedades del fluido en el fondo del pozo no se puede determinar con un alto grado de precisión. Leon Robinson (2004) desarrolló un índice empírico simple (CCI) para ayudar a predecir la limpieza del pozo.

$$CCI = \frac{K * MW * Vann}{400000}$$

Donde,

CCI= Índice de capacidad de carga

K= índice de consistencia, cP

MW= Peso del lodo, ppg

Vann= Velocidad anular, ft/min

El producto de las tres variables más importantes e influyentes en la relación de transporte (K, MW y Vann) es igual a un valor de alrededor de 400000 cuando los recortes se elevan correctamente a la superficie. Se indica una buena limpieza del orificio cuando los cortes tienen bordes afilados. Los bordes redondeados indican que hay una acción de volteo en el espacio anular porque los recortes no se transportan rápidamente a la superficie.

De acuerdo con la bibliografía consultada, se espera que el índice o la proporción de limpieza del pozo sea 1 o mayor que 1 para una buena condición de limpieza. Sin embargo, cuando se diseña un programa de perforación, es recomendable mantener el valor de CCI en 5, ya que en la práctica se ha observado que un valor de 1 no es suficiente para garantizar una óptima limpieza de pozo mientras se perfora. Cuando un valor de CCI es 0.5 o menos, los cortes son más redondeados y pequeños debido a una limpieza ineficiente del pozo (mayor tiempo de residencia en el espacio anular). Se puede lograr una buena limpieza del pozo aumentando el valor de (K) y la velocidad anular. Este CCI es aplicable en secciones de orificios verticales con inclinación de 0 a 30 grados.

Índice de capacidad de carga para pozos desviados y horizontales

Para la sección de orificio desviada y horizontal, se debe modificar el (CCI). Tobenna (2010) encontró una relación entre TI (Índice de transporte) y (CCI) que permitirá el uso de (CCI) en pozos con inclinación superior a 30 grados.

$$CCI = \frac{K * TI}{3585 Aa * RF}$$

Donde,

CCI= Índice de capacidad de carga

K= índice de consistencia, cP

TI= Índice de transporte

Aa= Área del anular

RF= Factor reológico

A continuación, se describirá cada una de las variables involucradas en el cálculo del índice de capacidad de carga (CCI) @

Índice de consistencia (K)

“Indica la consistencia del fluido, dado que el aumento de “k” indica un aumento en la concentración de sólidos o disminución del tamaño de las partículas, es decir, si el valor de “k” es alto, el fluido es más viscoso y si el valor de “k” es bajo, el fluido es menos viscoso. Se expresa en [cP].” (Pennwell Publishing Company, 1996).

$$K = 511^{(1-n)} * \theta 300$$

Puesto que la lectura del viscosímetro a 300 revoluciones por minuto (rpm) es igual a la suma de los valores de viscosidad plástica (PV) y yield point (YP),

$$K = 511^{(1-n)} * (PV + YP)$$

Donde,

K= Índice de consistencia, cP
n= Índice de comportamiento de flujo
 $\theta 300$ = Lectura viscosímetro a 300 rpm
PV= viscosidad plástica, lb/100 ft²
YP= yield point, lb/100 ft²

Índice de comportamiento de flujo (n)

Es la relación numérica entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte de un fluido en un

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

gráfico “log/log”. Este valor describe el grado de comportamiento adelgazante por corte de un fluido, es decir, la capacidad de un fluido para reducir la viscosidad por corte.

$$n = 3,32 * \text{Log} \frac{\Theta 600}{\Theta 300}$$

Puesto que la lectura del viscosímetro a 600 revoluciones por minuto (rpm) es igual a la suma de dos veces el valor de viscosidad plástica (PV), más el valor del yield point (YP),

$$n = 3,32 * \text{Log} \frac{2PV + YP}{PV + YP}$$

Donde,

n= Índice de comportamiento de flujo

$\Theta 300$ = Lectura a 300 rpm

$\Theta 600$ = Lectura a 600 rpm

PV= Viscosidad plástica, lb/100 ft²

YP= yield point, lb/100 ft²

Velocidad anular (Vann)

La velocidad con la cual el fluido de perforación o el cemento se desplaza en el espacio anular

$$V_{ann} = \frac{24.5 * Q}{Dh^2 - Dp^2}$$

Donde,

V_{ann} =Velocidad anular, ft/min

Q = Caudal de bombeo, GPM

D_h^2 = Diámetro del hueco, in²

D_p^2 = Diámetro externo de la sarta de perforación, in²

2.3.2. Concentración de cortes en el anular (CCA)

La concentración de cortes en el anular (CCA) es una herramienta eficaz que puede indicar cuántos cortes generados durante la perforación se cargan en el espacio anular. Esta concentración de sólidos tiene un límite que se supone no debe excederse, el cual está dentro del rango del 5% al 8%.

Si la (CCA) excede el límite, puede provocar graves problemas en el pozo. La tabla 3 presenta algunos problemas generados y su impacto debido a una alta concentración de cortes en el espacio anular.

Tabla 3

Problemas y su impacto por acumulación de sólidos en el anular.

Problemas	Impacto
Aumento de las lecturas de PV y YP	• Transporte de cortes deficiente • ECD altos • Posible ruptura de la formación y pérdida de circulación.
Mayor pérdida de fluidos / torta de filtración espesa	• Pegado diferencial • Alto par y arrastre

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

ROP lento	• Costo y tiempo incrementado
Aumento de densidad	• Posible ruptura de la formación
	• Aumenta la dilución y la adición de productos químicos para mantener la densidad adecuada.
Desplazamiento deficiente del cemento	• Canales que permiten la comunicación de presión hasta el pozo.
Mayor abrasión y desgaste de bombas de lodo, motores y herramientas de fondo de pozo	• Costo incrementado
	• Tiempo perdido
Incremento del costo de eliminación de los desechos de perforación.	• Ambiental
	• Salud y Seguridad

Nota: Mohamed, et. Al. (2020).

Newitt y col. (1955) calculó la concentración de cortes en el espacio anular (CCA), sin embargo, el método API es el más utilizado en la industria.

$$CCA\% = \frac{ROP * Dh^2}{1471 * Q * TR} * 100$$

Donde,

CCA= Concentración de cortes en el anular, %

ROP= Tasa de perforación

Dh²= Diámetro del hueco, in²

Q= Caudal de bombeo, GPM

TR=Relación de transporte, %

Relación de transporte (TR)

$$TR\% = \left(1 - \frac{V_s}{V_{ann}}\right) * 100$$

Donde,

TR= Relación de transporte, %

V_s= Velocidad de deslizamiento, ft/min

V_{ann} = Velocidad anular, ft/min

Velocidad de deslizamiento (V_s)

Para fines prácticos se tratarán 2 enfoques distintos para el cálculo de la velocidad de deslizamiento, los cuales serán útiles dependiendo de la información con la que se disponga o se pueda obtener.

Enfoque 1 para el cálculo de la velocidad de deslizamiento

$$V_s = 86,5 * \sqrt{d_c \left(\frac{\rho_c}{\rho_M} - 1 \right)}$$

Donde,

V_s= Velocidad de deslizamiento, ft/min

d_c = Diámetro de partícula, in

ρ_c= Densidad de la partícula, LPG

ρ_M= Densidad del lodo, LPG

Enfoque 2 para el cálculo de la velocidad de deslizamiento

- I. Determinar la velocidad de elevación de corte (ft/min):

$$V_{cr} = \frac{60}{\left(1 - \left(\frac{Dp}{Dh}\right)^2\right) * \left(0,64 + \frac{18,16}{ROP}\right)}$$

- II. Determinar la velocidad anular (ft/min):

$$V_{ann} = \frac{24.5 * Q}{Dh^2 - Dp^2}$$

- III. Determinar la velocidad de deslizamiento (ft/min):

$$V_s = V_{ann} - V_c$$

A continuación, se presenta la tabla 4, en la cual se establece en cuadro comparativo entre los distintos modelos y sus aportes más representativos:

Tabla 4

Modelos previos experimentales y teóricos de limpieza de pozo

Fuente	Parámetro principal	Parámetro secundario	Conclusiones
Li and Walker 1999	Flujo de fluido		La capacidad de carga aumenta drásticamente para un caudal mayor que la velocidad crítica de transporte de los recortes.
Okrajni and Azar 1986	Reología del lodo	Patrón de flujo	En flujo laminar, lodos con mayor relación YP / PV proporcionan un mejor transporte de los recortes. El transporte de recortes no se vio afectado por la reología del lodo en flujo turbulento.
Saasen 1998	Reología del lodo	Rotación de la sarta	La rotación de la tubería conduce a un transporte de recortes más eficiente para el lecho de recortes de estructura de gel.
Li and Walker 1999	Reología del lodo	Inclinación	La limpieza del pozo es más eficiente con un fluido de baja viscosidad en flujo turbulento para el pozo horizontal y casi horizontal, o con un fluido de alta viscosidad en flujo laminar para el pozo vertical y casi vertical.
Brown and Weaver 1989	Inclinación		Los ángulos entre 40 ° y 60 ° son los peores ángulos para el transporte de recortes tanto para los métodos de suspensión y "Rolling"

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

Peden and Ford 1990	Rotación de la sarta	Viscosidad y velocidad del fluido, excentricidad y tamaño del hueco.	La rotación de la tubería tiene un efecto significativo sobre la velocidad mínima del fluido en fluidos de viscosidad media o alta. MTV se redujo en el + 50% de excentricidad, pero no hubo efectos notables de la rotación de la tubería en el - 50% de excentricidad.
Sifferman and Becker 1992	Rotación de la sarta	Inclinación, tamaño de partícula y ROP.	La rotación de la tubería tiene el mayor efecto en la limpieza del pozo con una inclinación cercana a la horizontal, para cortes pequeños y baja ROP.
Sánchez and Bassal 2000	Rotación de la sarta	Manera de movimiento, inclinación y ROP.	El movimiento orbital puede mejorar de manera eficiente la limpieza del pozo. A 90 grados y velocidades de flujo bajas, la alta velocidad de rotación produce los mayores beneficios. Las velocidades de rotación más altas son mejores en inclinaciones más bajas.
Saasen 1998	Caída de presión		La altura del lecho de recortes se reduce cuando aumenta la caída de presión por fricción.
Li and Walker 1999	ROP		El aumento de la ROP da como resultado una mayor altura del lecho para un caudal de líquido fijo. Para una ROP determinada, un caudal de fluido más alto da como resultado una altura del lecho más baja.
Wang and Liu 1995	Densidad del lodo		La altura del lecho de los recortes y la velocidad crítica de transporte de los recortes disminuyen con el aumento de la densidad del lodo.
Bassal 1995	Tamaño y forma de la partícula	Tamaño de 2 a 7 mm	Las partículas más pequeñas son un poco más difíciles de limpiar.
Martins and Lourenco 1996	Tamaño y forma de la partícula	Tamaño de 2 a 6 mm	Las partículas más grandes siempre son más difíciles de transportar que las más pequeñas.
Sánchez and Bassal 2000	Tamaño y forma de la partícula	Tamaño de 2 a 7 mm	A alta velocidad de rotación y con lodo de alta viscosidad, los recortes más pequeños son más fáciles de transportar.
Peden and Ford 1990		Tamaño de 1.7 a 3.35 mm	Los recortes más pequeños eran más difíciles de transportar en todos los ángulos de desviación con un fluido de baja viscosidad. Mientras que los recortes más grandes eran más fáciles de transportar en ángulos bajos (de 0 ° a 50 °) con fluido de alta viscosidad.
Okrajni and Azar 1986		Inclinación	El transporte de sólidos se ve afectado levemente por la excentricidad en ángulos bajos, pero a medida que aumenta el ángulo de inclinación, el efecto se vuelve significativo en el flujo laminar.
Wang and Liu 1995	Excentricidad de la tubería		La concentración de cortes aumenta a medida que aumenta la excentricidad. La excentricidad de la tubería hace que aumente la velocidad anular crítica.

Nota: Adaptado de Mohammed (2018).

3. Análisis De La Limpieza De Pozo Y Su Efecto En El Avance De La Perforación

El uso simultaneo del índice de capacidad de carga (CCI) y concentración de cortes en el anular (CCA) permite determinar el máximo ROP sin comprometer la estabilidad del pozo.

Aplicación de un caso base para evaluar la tasa de perforación (ROP)

Con el fin de facilitar el análisis de la limpieza de pozo y su efecto en el avance de la

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

perforación, se plantea un caso base para analizar el comportamiento de las variables, los indicadores y su sensibilidad

Se tiene un pozo con las siguientes características reológicas y parámetros de perforación:

Tabla 5

Características del pozo caso base

Peso del lodo [MW]	12 LPG
Viscosidad plástica [VP]	23 lb/100 ft ²
Yield point [YP]	18 lb/100 ft ²
Diámetro de la broca [Dh]	8,5 in
Diámetro tubería de perforación [Dp]	5 in
Caudal de bombeo [Q]	400 GPM
Tasa de perforación [ROP]	50 ft/hr

El enfoque aquí es estudiar los datos utilizados de los parámetros de perforación y la reología del lodo y analizarlos para ver las propiedades del lodo y el efecto de los parámetros de perforación en la limpieza del pozo y el rendimiento de la ROP.

La secuencia de pasos a seguir para evaluar la limpieza del pozo antes de comenzar a mejorar la ROP es la siguiente:

- Verificar que el valor del CCI sea igual o mayor a 5
 - a. Índice de comportamiento de flujo(n)

$$n = 3,32 * \text{Log} \frac{2PV + YP}{PV + YP}$$

$$n = 3,32 * \text{Log} \frac{2(23\text{lb}/100 \text{ft}^2) + 18 \text{lb}/100 \text{ft}^2}{23 \text{lb}/100 \text{ft}^2 + 18\text{lb}/100 \text{ft}^2}$$

$$n = 0,64$$

b. Índice de consistencia (K)

$$K = 511^{(1-n)} * (PV + YP)$$

$$K = 511^{(1-0,65)} * (23 \text{lb}/100 \text{ft}^2 + 18\text{lb}/100 \text{ft}^2)$$

$$K = 387,1 \text{ lb}/100 \text{ft}^2$$

c. Velocidad anular (Vann)

$$Vann = \frac{24.5 * Q}{Dh^2 - Dp^2}$$

$$Vann = \frac{24.5 * 400 \text{ GPM}}{8,5 \text{ in}^2 - 5\text{in}^2}$$

$$Vann = 207,41 \text{ ft}/\text{min}$$

d. Índice de capacidad de carga (CCI)

$$CCI = \frac{K * MW * Vann}{400000}$$

$$CCI = \frac{387,1 \text{ lb}/100 \text{ft}^2 * 12 \text{ ppg} * 207,41 \text{ ft}/\text{min}}{400000}$$

$$CCI = 2,4$$

Por el valor del CCI obtenido se puede decir que la limpieza del pozo no será tan eficiente

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

como se desea al tratarse de un valor menor a 5 y es posible que se presenten algunas complicaciones y/o problemas de pozo mientras se perfora, si no se recalculan algunos parámetros como el caudal de bombeo o se optimizan propiedades reológicas del lodo como la viscosidad plástica (VP) y el yield point (YP). Como primera alternativa se considerará un incremento en la tasa de bombeo, para ello, se calcula el valor del caudal que permita tener un valor de CCI igual a 5

$$CCI = \frac{K * MW * Vann}{400000}$$

$$5 = \frac{387,1 \text{ lb}/100 \text{ ft}^2 * 12 \text{ ppg} * Vann}{400000}$$

$$\mathbf{Vann = 430,5 \text{ ft}/min}$$

$$Vann = \frac{24.5 * Q}{Dh^2 - Dp^2}$$

$$430,5 = \frac{24.5 * Q}{8,5 \text{ in}^2 - 5 \text{ in}^2}$$

$$Q = \frac{24.5 * Q}{Dh^2 - Dp^2}$$

$$\mathbf{Q = 830 \text{ GPM}}$$

830 galones por minuto (GPM) es la tasa de bombeo que garantiza una óptima limpieza en el pozo. Con este valor, el siguiente paso es evaluar si se cuenta con los equipos necesarios para entregar este nuevo caudal. En caso de no ser posible, incrementar el yield point y disminuir la

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

viscosidad plástica del lodo son las siguientes opciones a considerar.

- **Evaluar la concentración de cortes en el anular (CCA).**

El CCA se evalúa para comprobar si existe la posibilidad de optimizar el rendimiento de la tasa de perforación calculando el CCA con la ROP medida actual.

- a. Velocidad de elevación de corte (Vcr):

$$V_{cr} = \frac{60}{\left(1 - \left(\frac{Dp}{Dh}\right)^2\right) * \left(0,64 + \frac{18,16}{ROP}\right)}$$

$$V_{cr} = \frac{60}{\left(1 - \left(\frac{5 \text{ in}}{8,5 \text{ in}}\right)^2\right) * \left(0,64 + \frac{18,16}{50 \text{ ft/hr}}\right)}$$

$$V_{cr} = 91,45 \text{ ft/min}$$

- b. Velocidad anular (ft/min):

$$V_{ann} = \frac{24.5 * Q}{Dh^2 - Dp^2}$$

$$V_{ann} = \frac{24.5 * 830 \text{ GPM}}{8,5 \text{ in}^2 - 5 \text{ in}^2}$$

$$V_{ann} = 430,37 \text{ ft/min}$$

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

c. Velocidad de deslizamiento (V_s):

$$V_s = V_{ann} - V_{cr}$$

$$V_s = 430,37 \text{ ft/min} - 91,45 \text{ ft/min}$$

$$\mathbf{V_s = 338,92 \text{ ft/min}}$$

d. Relación de transporte (TR):

$$TR\% = \left(1 - \frac{V_s}{V_{ann}}\right) * 100$$

$$TR\% = \left(1 - \frac{338,92 \text{ ft/min}}{430,37 \text{ ft/min}}\right) * 100$$

$$TR\% = \left(1 - \frac{338,92 \text{ ft/min}}{430,37 \text{ ft/min}}\right) * 100$$

$$TR\% = 21,24\%$$

e. Concentración de cortes en el anular (CCA):

$$CCA\% = \frac{ROP * Dh^2}{1471 * Q * TR} * 100$$

$$CCA\% = \frac{50 \text{ ft/hr} * 8,5 \text{ in}^2}{1471 * 830 \text{ GPM} * 0,2124} * 100$$

$$CCA = 1,39\%$$

Cuando la CCA es menor que 5% significa que existe la posibilidad de mejorar la velocidad de perforación (ROP). Para conocer cuál es su máximo valor permisible se debe calcular a partir

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

de un valor de CCA igual al 5%. Considerando que la ROP se encuentra implícita en la velocidad de levantamiento de corte (V_{cr}), la cual está involucrada en el cálculo de la velocidad de deslizamiento (V_s) y esta última está presente en la relación de transporte (TR), el proceso es el siguiente:

$$V_{cr} = \frac{60}{\left(1 - \left(\frac{Dp}{Dh}\right)^2\right) * \left(0,64 + \frac{18,16}{ROP}\right)}$$

Agrupando las variables de una manera estratégica para hacer más sencillo el despeje de la variable ROP en la ecuación final, se tiene que

$$V_{cr} = \frac{60 * Dh^2 * ROP}{(Dh^2 - Dp^2) * (0,64 * ROP + 18,16)}$$

Reemplazando la velocidad de levantamiento de corte (V_{cr}) en la ecuación de relación de transporte (TR) se tiene que

$$TR = \left(1 - \frac{V_s}{V_{ann}}\right)$$

$$TR = \left(1 - \frac{V_{ann} - V_{cr}}{V_{ann}} \right)$$

$$TR = \left(\frac{V_{cr}}{V_{ann}} \right)$$

De la ecuación para el cálculo de la concentración de cortes en el anular (ecuación final) se obtiene la máxima velocidad de perforación permisible (CCA igual a 5 %)

$$CCA = \frac{ROP * Dh^2}{1471 * Q * TR}$$

$$ROP = \frac{1471 * CCA\% * Q * TR}{Dh^2}$$

Al reemplazar la relación de transporte (TR) en términos de la velocidad de levantamiento de corte (Vcr) y la velocidad anular (Vann) se obtiene la siguiente expresión

$$ROP = \frac{1471 * CCA\% * Q * V_{cr}}{Dh^2 * V_{ann}}$$

Finalmente, de reemplaza la velocidad de levantamiento de corte (V_{cr}) en términos de la velocidad de perforación (ROP)

$$ROP = \frac{1471 * CCA\% * Q * 60 * Dh^2 * ROP}{Dh^2 * V_{ann} * (Dh^2 - Dp^2) * (0,64 * ROP + 18,16)}$$

$$1 = \frac{88260 * CCA\% * Q}{V_{ann} * (Dh^2 - Dp^2) * (0,64 * ROP + 18,16)}$$

$$ROP = \frac{88260 * CCA\% * Q}{0,64 * V_{ann} * (Dh^2 - Dp^2)} - 28,38$$

$$ROP = \frac{88260 * 5\% * 830 \text{ GPM}}{0,64 * 430,37 * (8,5^2 \text{ in}^2 - 5^2 \text{ in}^2)}$$

$$ROP = 253,08 \text{ ft/hr}$$

Aproximadamente 253 pies por hora(ft/hr) es la máxima velocidad a la que se puede perforar

sin que se presenten problemas de limpieza y/o estabilidad de pozo. Una vez se obtienen los valores óptimos de tasa de bombeo y velocidad de perforación, se deben monitorear constantemente los índices CCI y CCA durante toda la operación de perforación ya que se pueden presentar zonas críticas en las que no sea posible bombear suficiente lodo de perforación o avanzar a la máxima velocidad de perforación.

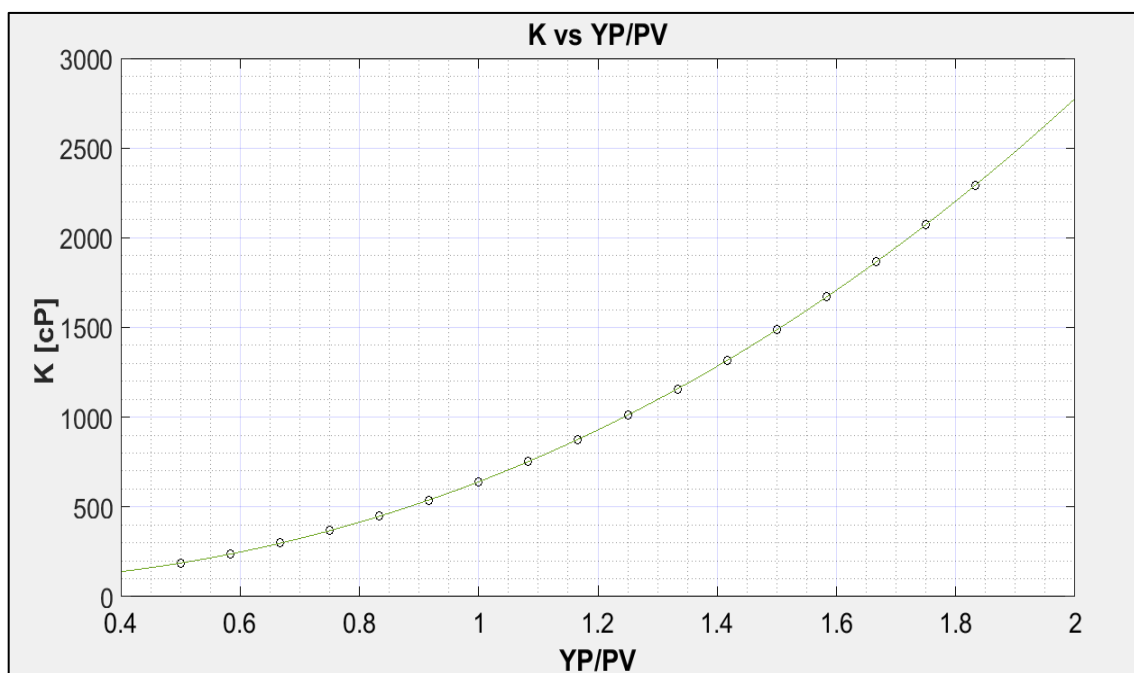
Para controlar y administrar de manera correcta los índices CCI y CCA es necesario evaluar la relación entre las propiedades reológicas del lodo y los parámetros de perforación que tienen más incidencia sobre la velocidad de perforación.

3.1. Análisis de la velocidad de perforación con el CCI

Aunque el índice de capacidad de carga no tiene una relación directa con la velocidad de perforación, ya que solo da una idea de cómo se limpia la sección del pozo, pero no informa sobre el rendimiento de la velocidad de perforación, es claro que una eficiente limpieza de ripios permitirá un mayor avance en la perforación del pozo. Por esta razón es necesario analizar la relación que tienen las variables como la viscosidad plástica, el yield point, el índice de consistencia y el índice de comportamiento de flujo con el CCI.

3.2. Relación entre la viscosidad plástica (VP) y el yield point (YP)

La relación de YP sobre PV puede indicar cómo el fluido de perforación es capaz de levantar los recortes de perforación en la sección del pozo. YP sobre PV tiene una fuerte relación directa con el índice de consistencia. El índice de consistencia o el valor K aumentará si la relación aumenta como se muestra en la figura 20.

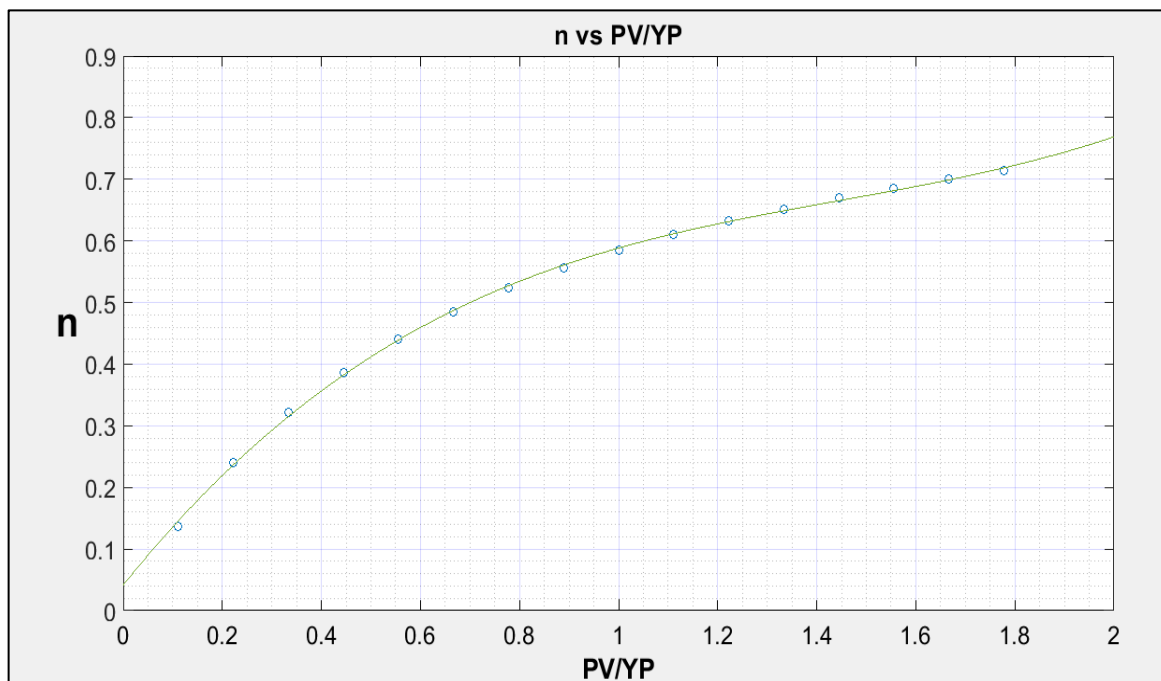
Figura 20*Relación de viscosidad plástica y yield point.*

El índice de consistencia indica cómo el fluido de perforación puede sostenerse o resistir en diferentes entornos de operación de perforación, como pozos de alta presión y temperatura (HPHT). Los fluidos de perforación que tienen un alto valor de índice de consistencia o relación YP sobre PV pueden resistir la degradación o la reducción repentina de las propiedades de los fluidos de perforación.

Para optimizar la relación de YP sobre PV y PV sobre YP, la forma óptima es aumentar el punto de fluencia y disminuir PV. Optimizar la ración de YP sobre PV mejorará K , sin embargo, optimizar o reducir PV sobre YP mejorará el índice de comportamiento del flujo(n). Eso ayudará a ajustar el cizallamiento y el tixotrópico del lodo de perforación para que el (CCI) funcione perfectamente. La relación de PV sobre YP tiene una fuerte relación directa con el índice de comportamiento del flujo como se muestra en figura 21.

Figura 21

Relación entre índice de comportamiento de flujo(n) y PV/YP .



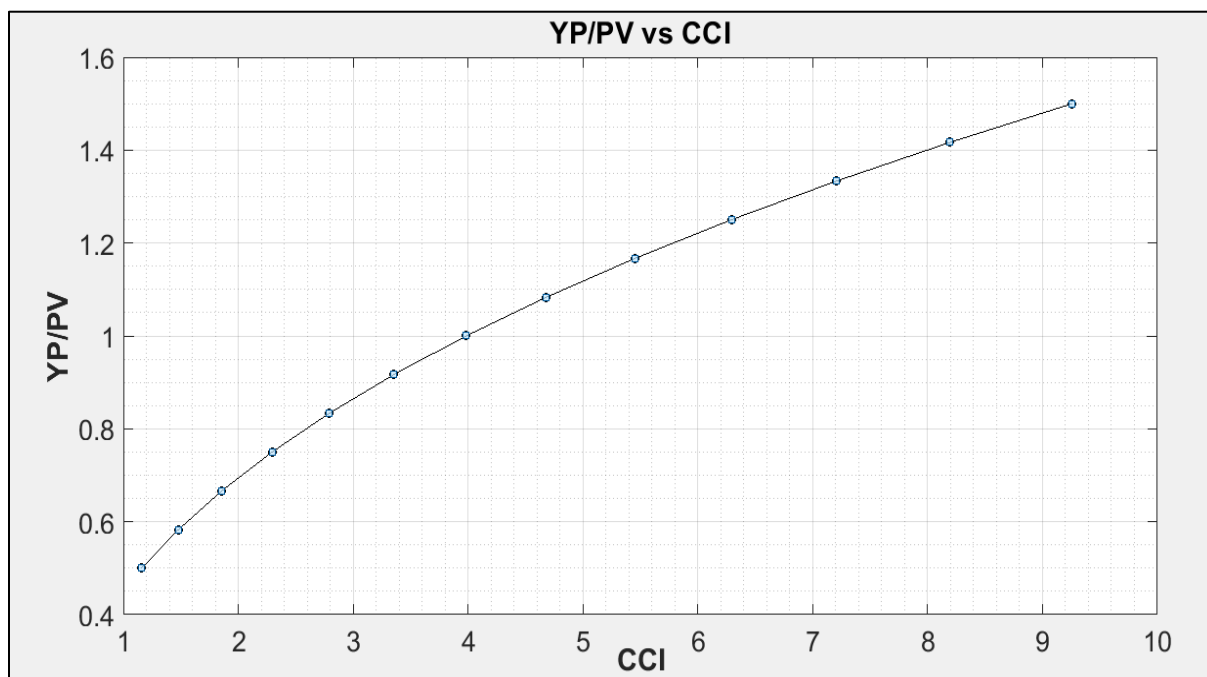
Para aumentar YP , se debe agregar bentonita con lodo base agua al sistema de lodo. Por otro lado, la bentonita modificada u organofílica debe agregarse con lodo a base aceite. Sin embargo, si se han agregado los viscosificantes al sistema, la resistencia de gel del lodo aumentará y por esa razón se debe tomar en cuenta el aditivo de cal para ajustar el aumento de gelificación del lodo. La reducción de la viscosidad plástica se puede lograr agregando agua de perforación como proceso de dilución del lodo. El fenómeno tixotrópico aumenta la gelificación del lodo y eso conducirá a la pérdida de circulación o al lavado a través de la formación débil. Mientras que el fenómeno de adelgazamiento por cizallamiento del lodo podría inducir el desgaste de la pared de la sección del pozo y eso podría inducir el lavado y la pérdida de circulación si el caso también se agrava a través de la formación.

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

La única forma de ver el efecto de esta relación de YP sobre PV y PV sobre YP sobre la limpieza del pozo es a través de CCI. A medida que aumente el YP manteniendo constante la VP, el CCI aumentara, indicando una mejora en la limpieza del pozo. Este comportamiento se puede observar en la figura 22.

Figura 22

Relación entre YP/PV y el índice de capacidad de carga.

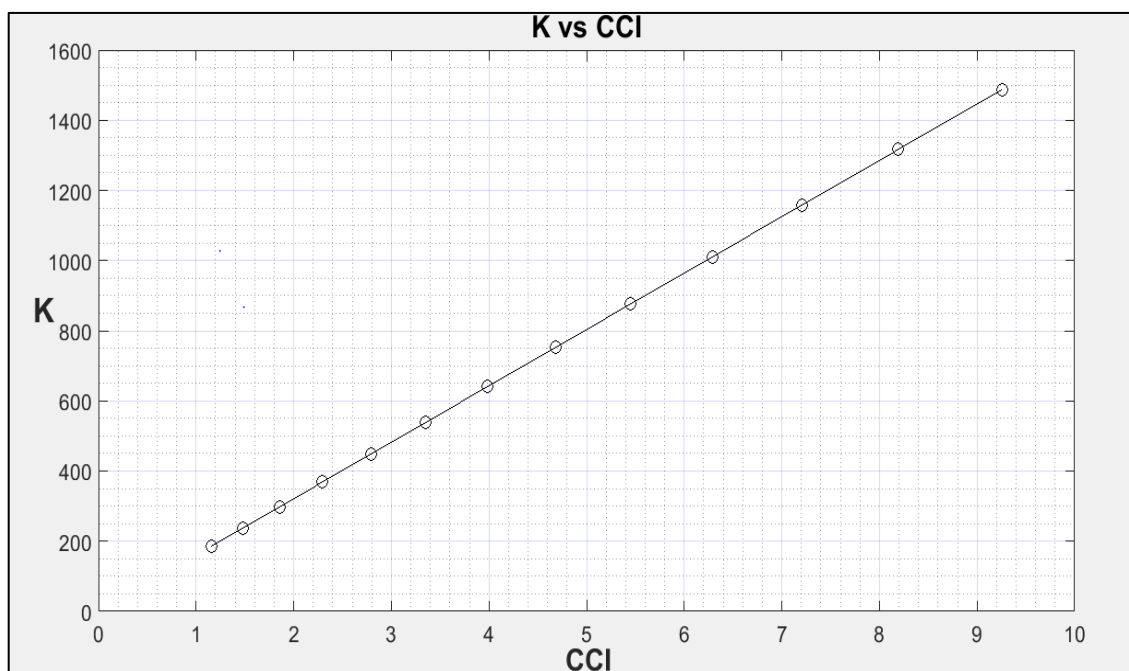


3.3 Índice de consistencia(K) y de comportamiento de flujo (n)

Para tener una idea clara del rendimiento de limpieza del pozo mediante el uso de CCI, dos factores principales que deben ajustarse de manera óptima son K y n. El aumento de K proporcionará un rendimiento de limpieza del pozo y la disminución de n asegurará lo mismo también y eso se obtendrá si el YP ha aumentado y el PV ha disminuido. Figuras 23 y 25 muestran los efectos de los parámetros K y n en el CCI.

Figura 23

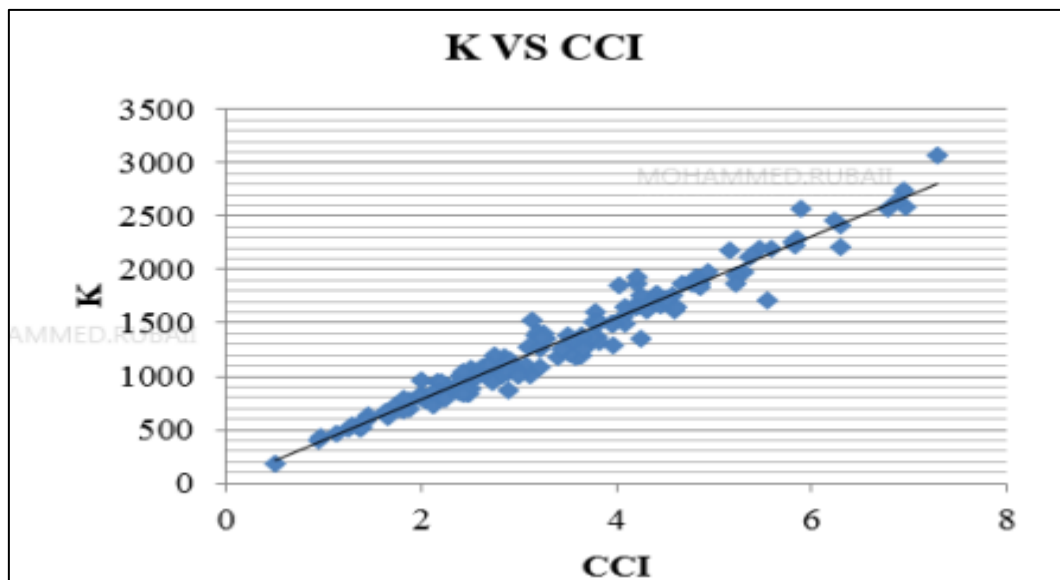
Relación entre el índice de consistencia y el índice de capacidad de carga.



La figura 24 fue obtenida del paper SPE-19223-MS “A new robust approach for hole cleaning to improve rate of penetration”. Su autor Mohammed Murif Al Rubaii realizó una investigación para determinar la relación que existe entre la limpieza del pozo y la velocidad de perforación. Una de las gráficas elaboradas por el autor fue el índice de consistencia (k) contra el índice de capacidad de carga (CCI) a partir de datos de campo, la gráfica permite evidenciar una tendencia similar con la figura 23, la cual es graficada a partir de las ecuaciones planteadas para el desarrollo del presente trabajo.

Figura 24

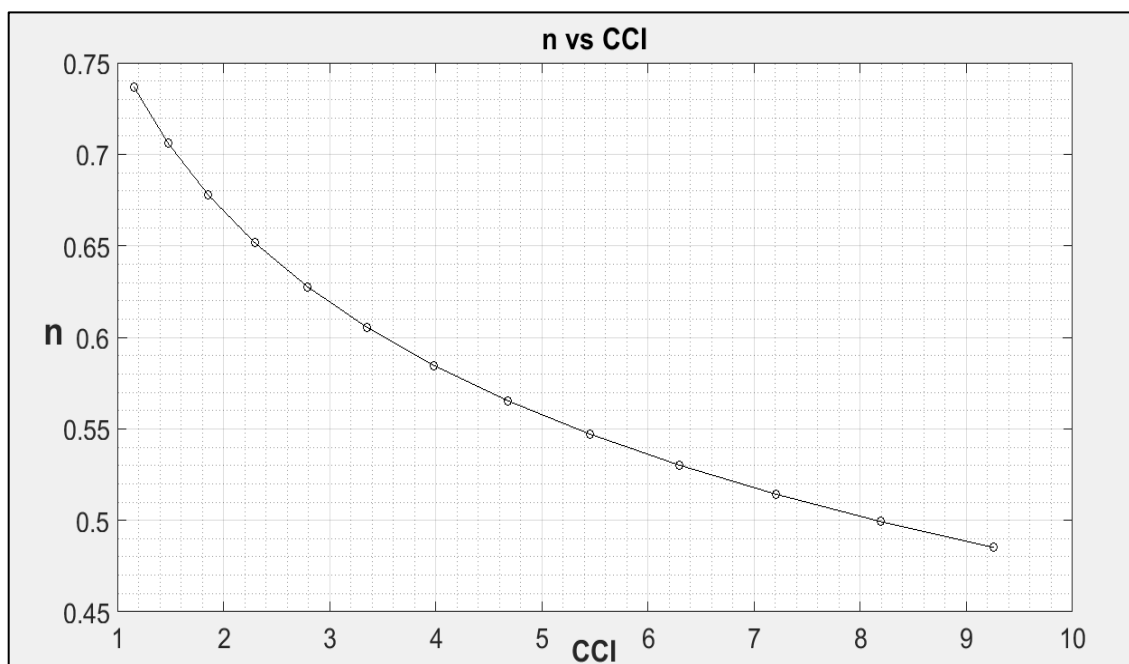
Relación K vs CCI a partir de datos de campo



Nota: Tomado de Mohammed (2018)

Figura 25

Relación entre el índice de comportamiento y el índice de capacidad de carga.

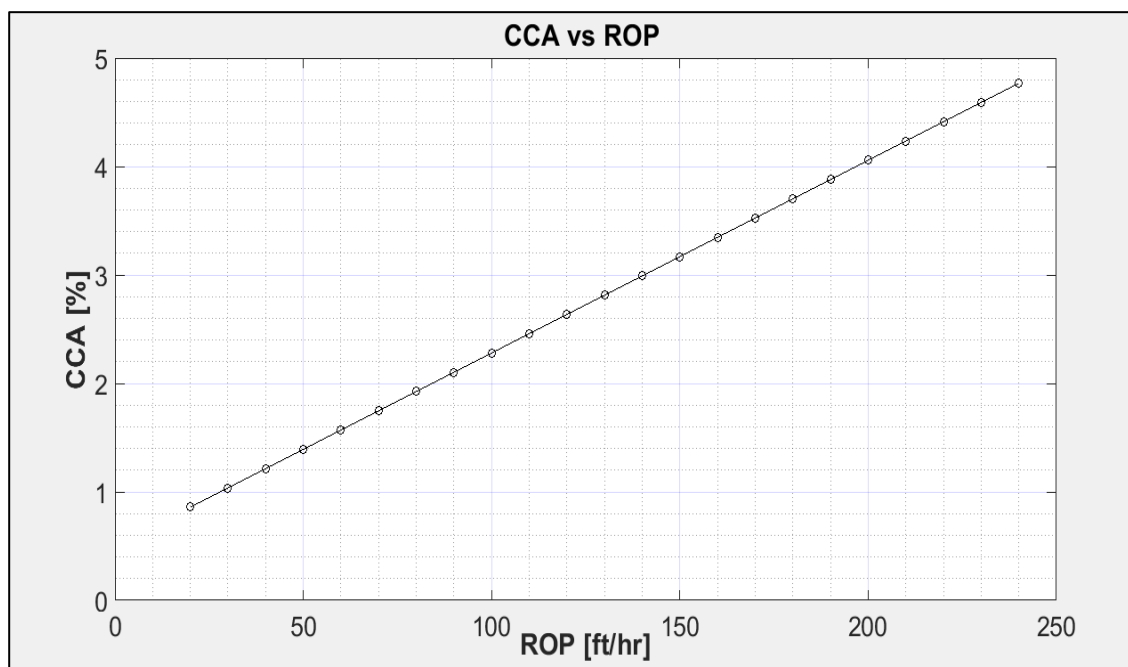


3.4 Análisis de la velocidad de perforación con el (CCA)

La relación entre la tasa de perforación y CCA es una relación directamente proporcional como se puede observar en la figura 26. A partir de esta relación podemos saber cuánto ROP podemos aplicar sin cargar con recortes el anular. Además, podemos aumentar la ROP hasta el límite del CCA permisible.

Figura 26

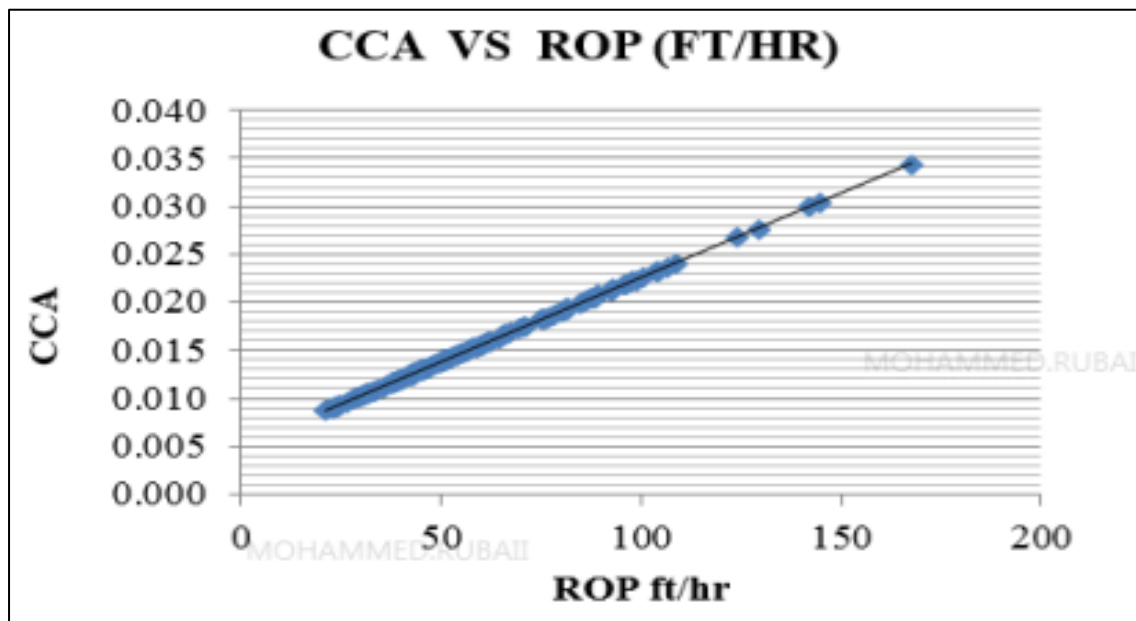
Relación entre la concentración de cortes en el anular y ROP.



La figura 27 fue obtenida del paper SPE-19223-MS “A new robust approach for hole cleaning to improve rate of penetration”. Una de las gráficas elaboradas por su autor Mohammed Murif Al Rubaii fue la concentración de cortes en el anular contra la velocidad de perforación a partir de datos de campo, la gráfica permite evidenciar una tendencia similar con la figura 26, la cual es graficada a partir de las ecuaciones planteadas para el desarrollo del presente trabajo.

Figura 27

Relación CCA vs ROP a partir de datos de campo



Nota: Tomado de Mohammed (2018)

3.5 Planteamiento de parámetros más influyentes para optimización en el avance de la perforación.

En la tabla 6 se presentan los principales parámetros de perforación que ayudan a optimizar la velocidad de perforación y la limpieza del pozo.

Tabla 6*Parámetros de perforación que optimizan la ROP y limpieza de pozo.*

Ítem	Variable	Parámetro	Acrónimo	Unidades	Mejorar la limpieza y optimizar ROP
1	Viscosidad plástica	Reología	PV	lb/100 ft ²	Disminuir
2	Yield point	Reología	YP	lb/100 ft ²	Aumentar
3	Índice de consistencia	Reología	K	cP	Aumentar
4	Índice de comportamiento de flujo	Reología	n	Adim	disminuir
5	Caudal	Perforación	Q	GPM	Aumentar
6	Velocidad anular	Perforación	Vann	ft/min	Aumentar
7	Velocidad de levantamiento de cortes	Perforación	Vcr	ft/min	Aumentar
8	Velocidad de deslizamiento	perforación	Vs	ft/min	Disminuir
9	Índice de capacidad de carga	Indicador de limpieza	CCI	adim	Siempre > 5
10	Concentración de cortes en el anular	Indicador de limpieza	CCA	%	Siempre < 5%
11	Índice de limpieza de pozo	Indicador de limpieza	ICH	adim	Siempre > 100

4. Propuesta de un nuevo indicador de limpieza de hueco (HCI)

El uso de (CCI) solo da una idea de cómo se limpia la sección del pozo, pero no informa sobre el rendimiento de perforación. Por otro lado, el índice (CCA) tiene un límite de la velocidad máxima de perforación que se puede alcanzar sin causar problemas de pozo o acumulación de cortes.

Como valor agregado del presente trabajo, por iniciativa del director del proyecto Emiliano Ariza León, se propone un índice de limpieza de pozo (por sus siglas en inglés Hole cleaning indicator-HCI) para pozos verticales, el cual considera las variables de los dos índices anteriores (CCI y CCA), entre las que se resaltan propiedades del lodo de perforación, geometría del pozo y de flujo que inciden en el avance en la perforación garantizando la limpieza del hueco. a partir de una relación entre ellos. Este nuevo índice permitirá evidenciar la limpieza del pozo y evaluar el comportamiento de la velocidad de perforación.

$$IHC = \frac{Q * (V_{ann} - V_s) * K * MW}{272 * ROP * Dh^2}$$

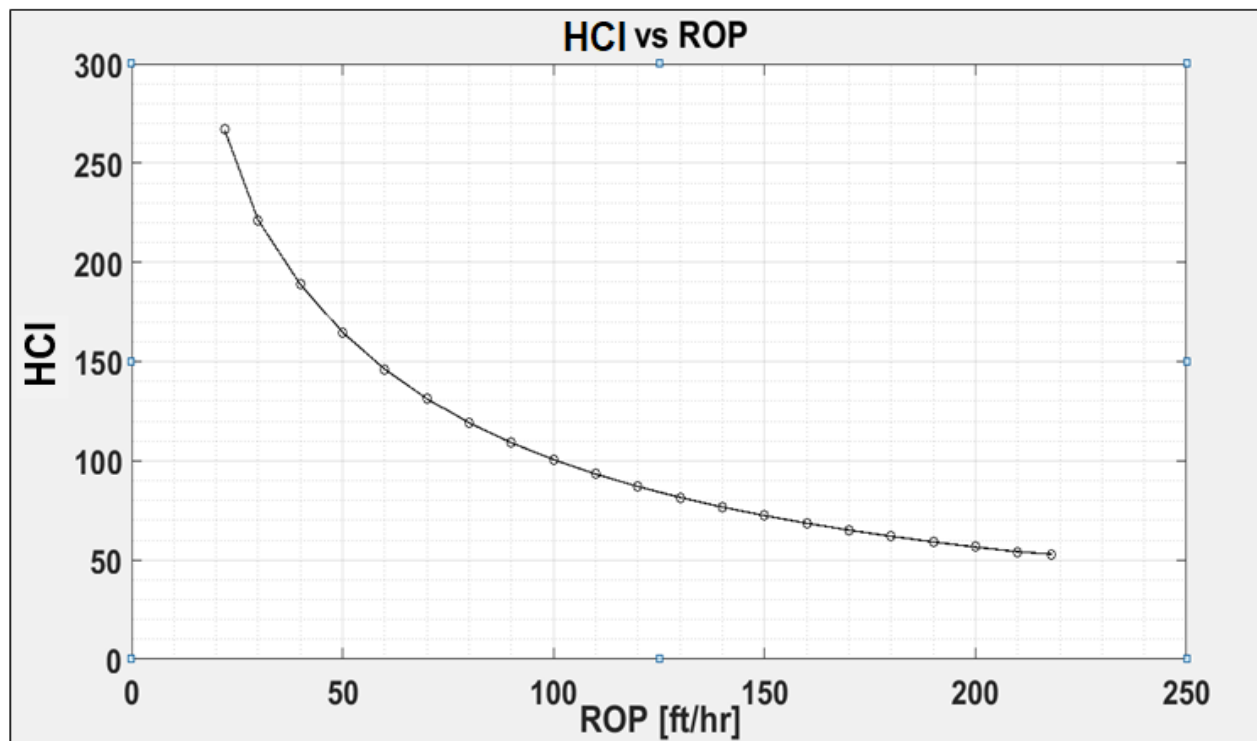
Cuando se diseña un programa de perforación se deben establecer valores deseados para CCA y CCI que estén dentro del rango permisible de cada uno de ellos. Con un valor igual o mayor a 5 para el CCI se espera una buena limpieza en el hueco, así mismo con un valor igual o menor al 5% para la CCA es predecible garantizar una máxima velocidad de perforación. Partiendo de dichos valores es posible determinar que un valor igual o mayor a 100 para el ICH es el que se espera mantener durante la perforación del pozo. Una gráfica de ROP vs ICH, como la que se muestra en la figura 28, permite observar el comportamiento de la ROP a partir de datos

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

definidos de los parámetros y determinar la máxima que se puede lograr favoreciendo la limpieza de pozo y así evitar otros problemas operacionales.

Figura 28

Relación entre ROP y el índice de limpieza de hueco.

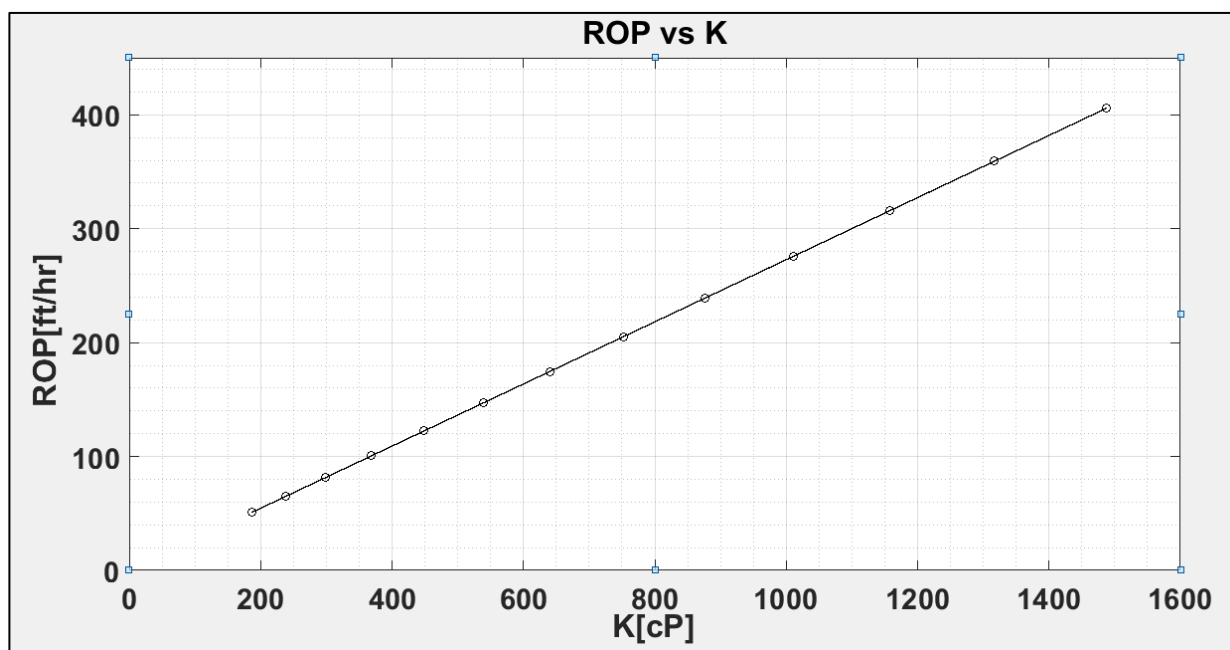


De acuerdo con la figura 28, en este caso para un ICH de 100, la máxima velocidad de perforación con la que se puede operar es de 100 ft/hr.

El indicador de limpieza de hueco permite además analizar el comportamiento de la velocidad de perforación ROP con respecto al índice de consistencia del lodo (K)

Figura 29

Relación entre el índice de consistencia(K) y ROP.



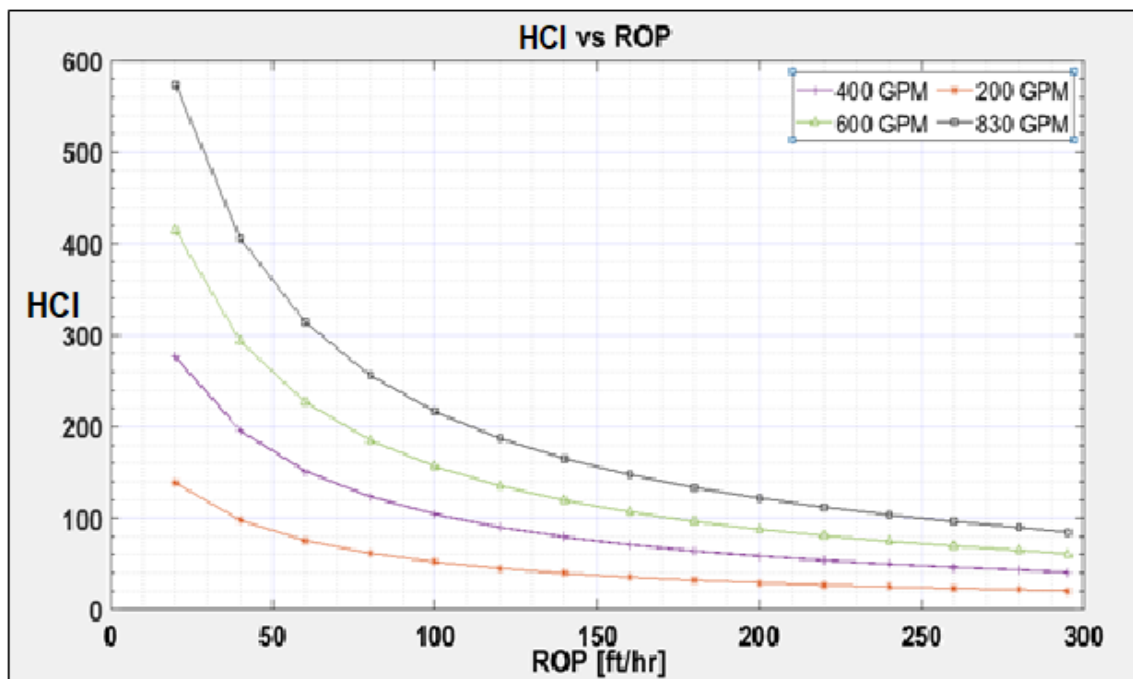
La figura 29 muestra una relación directamente proporcional entre la velocidad de perforación (ROP) y el índice de consistencia (K), lo que significa que siempre que se mantenga una limpieza de hueco apropiada implementando propiedades del lodo, se podrá perforar a una máxima ROP permisible y así mismo una velocidad de perforación excesiva ocasionara problemas de limpieza de pozo.

4.1. Análisis de sensibilidad

Las figuras 30,31,32,33 y 3430 corresponden a un análisis de sensibilidad realizado para cada una de los parámetros de perforación involucrados en el nuevo índice de limpieza de hueco (HCI).

Figura 30

Análisis de sensibilidad con el caudal Q.

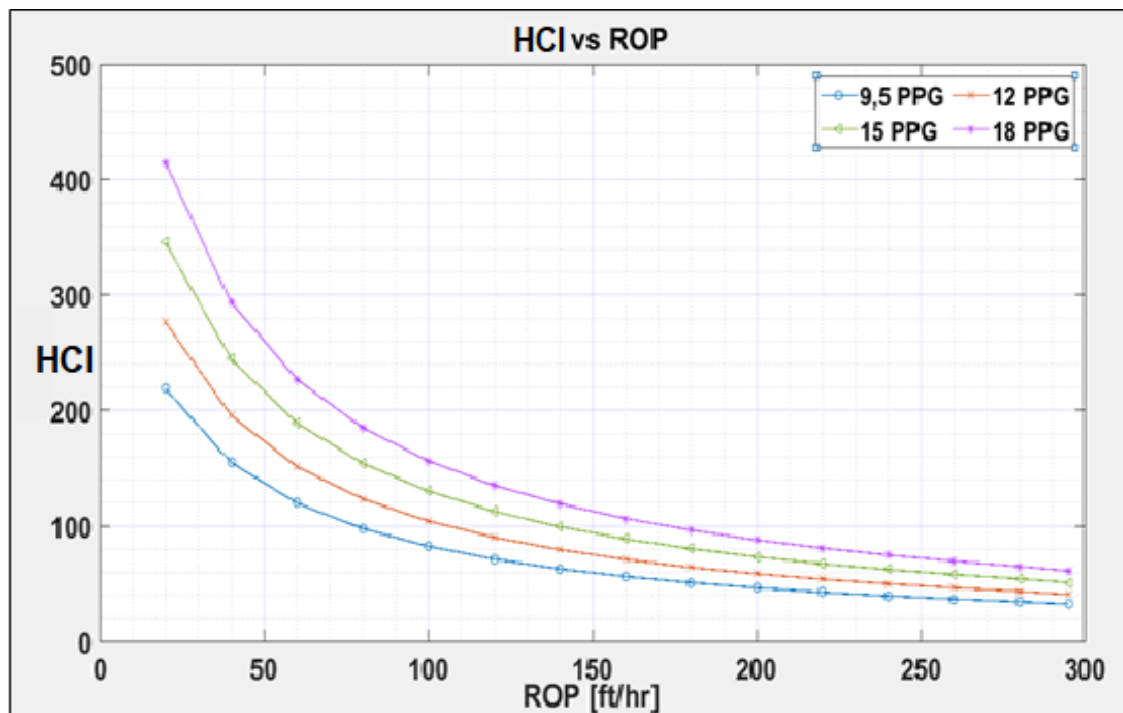


En la figura 30 aplicando sensibilidad para el caudal (Q) se puede observar como un incremento en los galones por minuto de fluido de perforación entregados al pozo, se incrementa el valor del índice de limpieza de hueco HCI y por consiguiente permite una mejora en el avance de la perforación. Esto se debe a que con un mayor caudal aumenta la velocidad anular (V_{ann}) y disminuye la velocidad de asentamiento de los sólidos, así, los cortes de perforación son transportados a superficie con una mayor eficiencia. Adicionalmente para la línea de caudal 830 GPM se comprueba que, para un HCI de 100, corresponde una ROP de 250 ft/hr, lo cual concuerda con lo determinado en el ejercicio práctico propuesto en el capítulo 3 y demuestra la consistencia con las correlaciones empleadas para su cálculo.

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

Figura 31

Análisis de sensibilidad con el peso del lodo (MW)

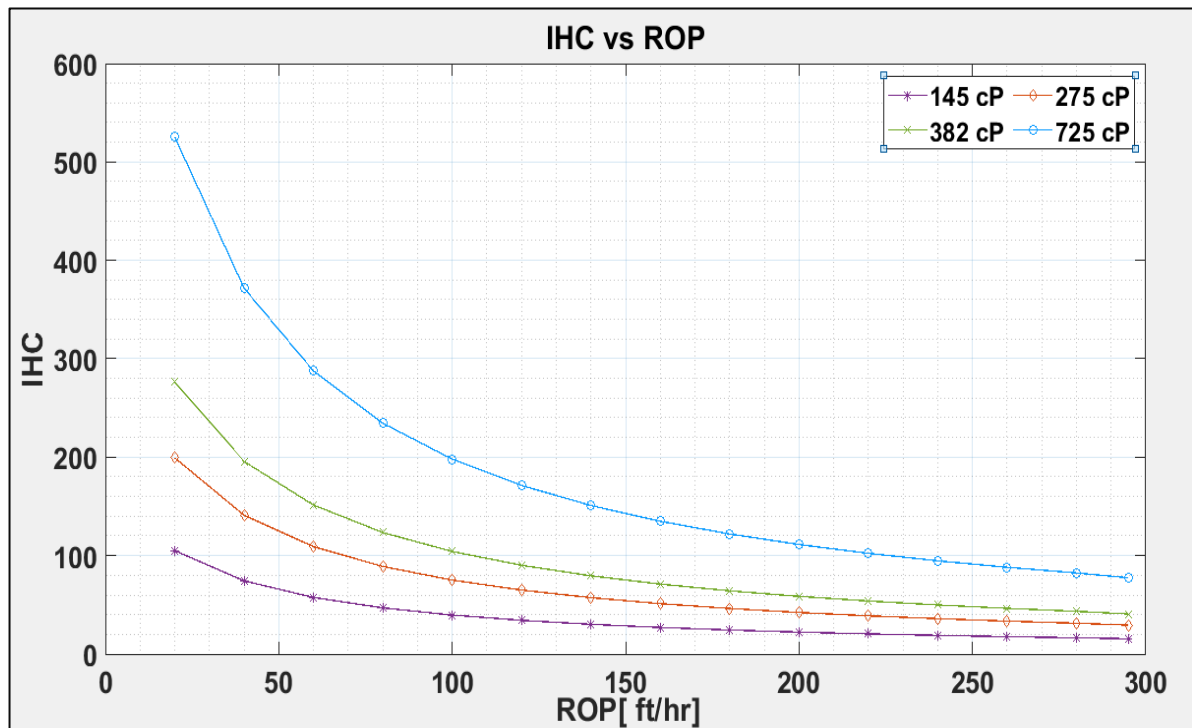


En la figura 31, se observa como el incremento en la densidad del fluido de perforación aumenta el índice de limpieza de pozo (ICH) y en consecuencia permite un óptimo avance en la perforación al permitir operar con una velocidad de perforación (ROP) mayor. Esto se debe a que al incrementarse el peso del lodo disminuye la velocidad de deslizamiento de los sólidos perforados que están siendo llevados fuera el pozo. Por supuesto esta densidad debe estar dentro de la ventana del lodo para evitar otros problemas en el pozo.

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

Figura 32

Análisis de sensibilidad con el índice de consistencia (K).

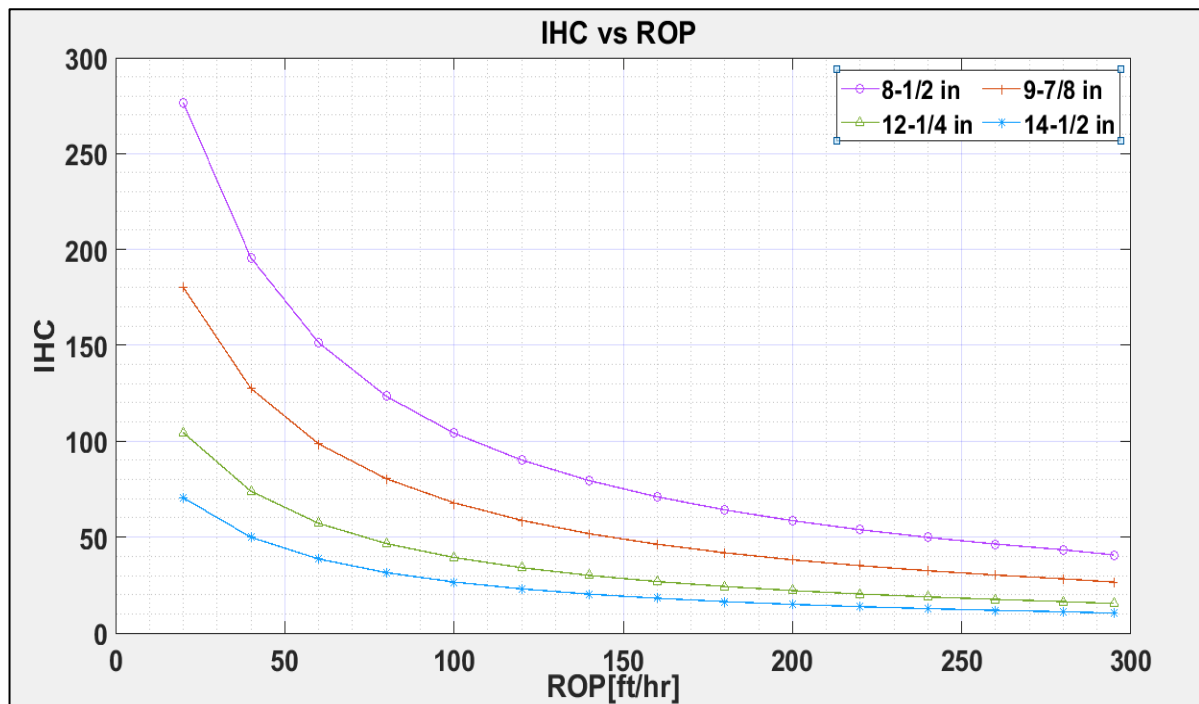


En la figura 32 de sensibilidad con el índice de consistencia (K), que es función del yield point (YP) y del índice de comportamiento de flujo (n), un incremento en el YP y disminución de n logra un incremento en K y por tanto mejora el proceso de limpieza dentro del pozo y por consiguiente permite una mejora en el avance de la perforación.

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

Figura 33

Análisis de sensibilidad con el diámetro del hueco (Dh).

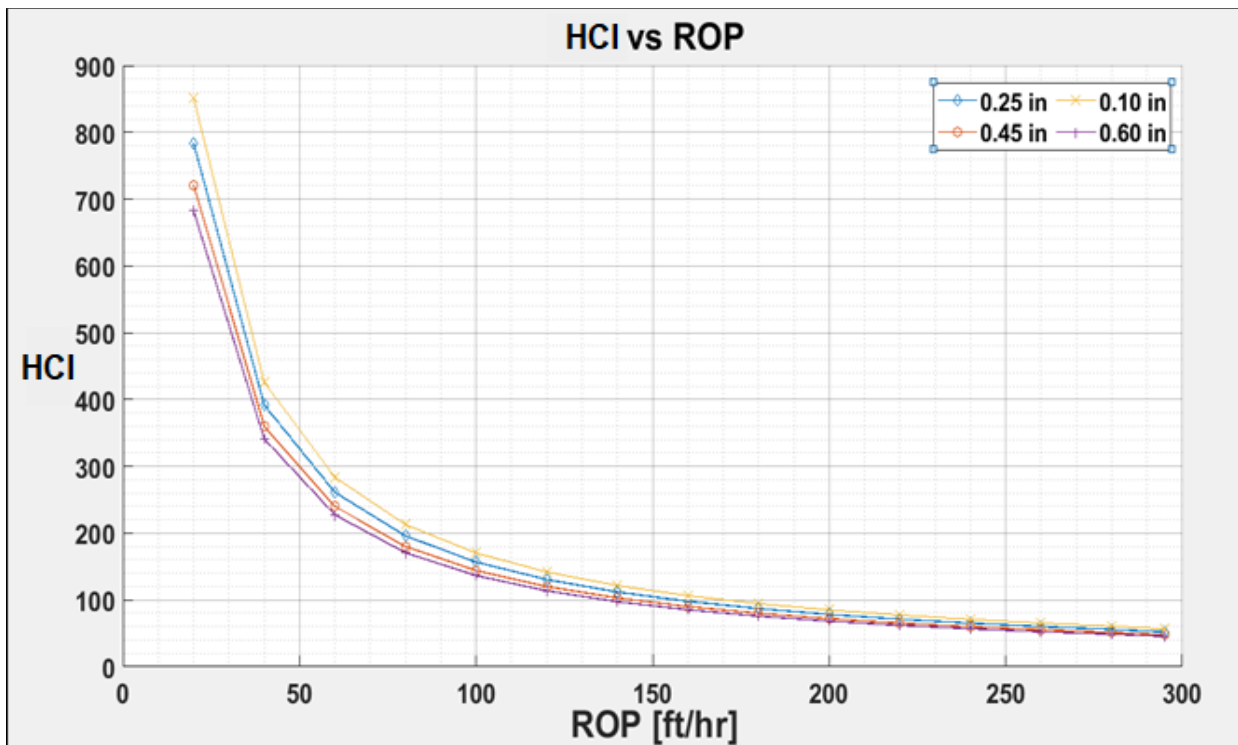


En la figura 33, aplicando sensibilidad con el diámetro del hueco (Dh) se puede observar como un incremento en el diámetro de la broca hace más complejo el proceso de transporte de sólidos a superficie debido a un mayor volumen de cortes generados al avanzar en la perforación del pozo, disminuyendo el índice de limpieza de hueco HCI y por consiguiente limitando el avance en la perforación.

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

Figura 34

Análisis de sensibilidad con el diámetro de partícula (d_c).



En la figura 34 de sensibilidad con la velocidad de deslizamiento (V_s), que es función del diámetro de partícula (d_c) y de la densidad de la partícula (ρ_c), un incremento en el diámetro (d_c), manteniendo constante la densidad de la partícula, es decir asumiendo la misma formación ya sea arenisca, arcilla, caliza. Logra un incremento en (V_s) y por tanto dificulta el proceso de limpieza dentro del pozo y por consiguiente impide una mejora en el avance de la perforación. Sin embargo, el cambio de diámetro de partícula no es un parámetro que altere en gran magnitud el proceso de limpieza de pozo ya que no se aprecia una diferencia significativa entre las cuatro curvas generadas para 0.10 in, 0.25 in, 0.45 in y 0.6 in.

4.2. Consistencia del (HCI) con los índices (CCA) y (CCI).

Al proponer un nuevo índice de limpieza de hueco, es necesario verificar su consistencia con los índices existentes. Partiendo del caso base para evaluar la tasa de perforación, descrito en el capítulo 3, se tiene una velocidad máxima de perforación igual a 253 ft/h, con un CCA igual al 5% y un CCI de 5.

Tabla 7

Características del pozo caso base

Peso del lodo [MW]	12 ppg
Viscosidad plástica [VP]	23 lb/100 ft ²
Yield point [YP]	18 lb/100 ft ²
Diámetro de la broca [Dh]	8,5 in
Diámetro tubería de perforación [Dp]	5 in
Caudal de bombeo [Q]	830 GPM

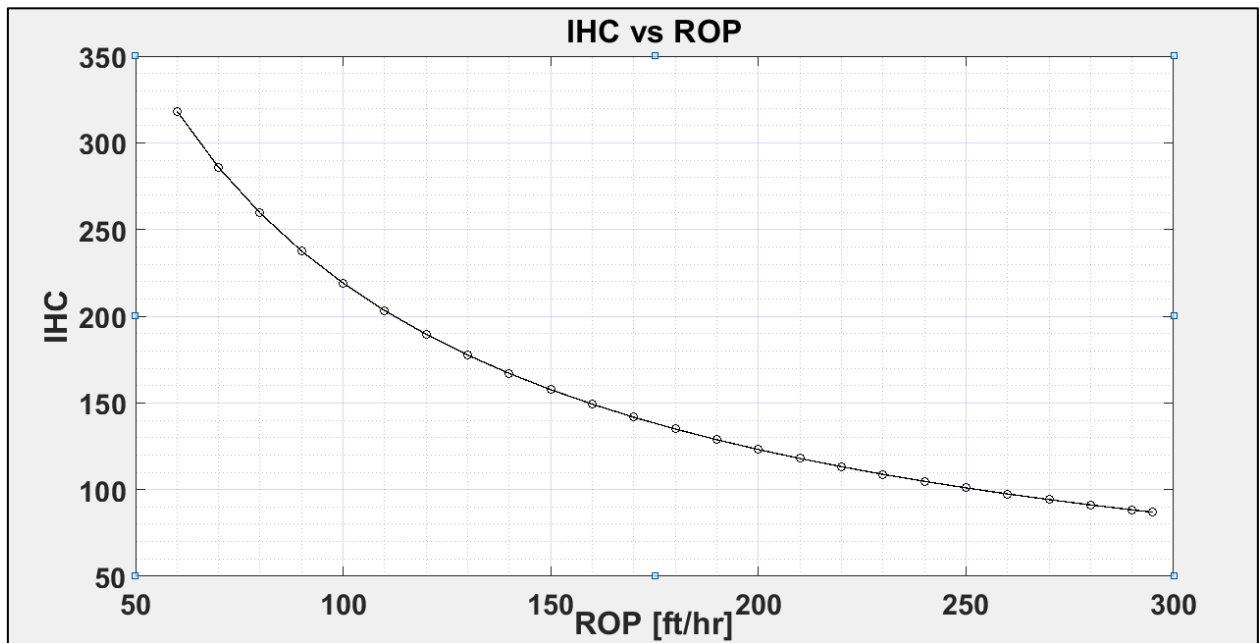
Nota: El caudal de bombeo (Q) inicial fue de 400 GPM, pero se demostró que para obtener un ICC de 5 era necesario aumentar el caudal hasta 830 GPM.

En la figura 35 se observa el comportamiento que tiene el índice de limpieza de hueco (HCI) con respecto a la velocidad de perforación (ROP) para el caso estudio del capítulo 3.

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

Figura 35

Relación entre ROP y el índice de limpieza de hueco (HCI) para el caso base.



En la gráfica se observa que para un valor de HCI de 100, correspondiente a un valor de CCI de 5 y CCA de 5%, la velocidad de perforación es de 253 ft/hr, por lo que se prueba la consistencia que tiene el índice HCI con los índices CCI y CCA.

5. Conclusiones

El análisis de sensibilidad permitió determinar que los parámetros más influyentes sobre la limpieza del pozo y la velocidad de perforación son el caudal de bombeo de lodo (Q), la geometría del pozo, es decir el diámetro del hueco (D_h) y diámetro de la tubería (D_p) y las propiedades del lodo, específicamente la viscosidad plástica (VP) y el yield point (YP), así mismo se determinó que parámetros como el diámetro de los cortes de perforación (dc) tienen mínima influencia.

Aumentar la densidad del fluido de perforación causa una disminución en la velocidad de perforación, y por consiguiente un retraso en la ejecución del proyecto, por esta razón la densidad del lodo nunca debe ser incrementada con el propósito de mejorar la limpieza del pozo.

Con el análisis realizado a las propiedades reológicas de los fluidos de perforación se determinó que valores bajos de viscosidad plástica proporcionan mal arrastre de recortes, obteniendo como consecuencia mayor concentración de sólidos y baja eficiencia de limpieza.

El diseño de un programa de perforación incluye valores objetivo para CCA y CCI que estén dentro del rango permisible de cada uno de ellos de acuerdo con las especificaciones permitidas. El valor más adecuado para un CCI es igual o mayor a 5, cuyo nivel de limpieza se considera adecuado, ahora bien, para la CCA, se espera que con un valor menos o igual al 5% se genere la velocidad de perforación máxima permisible. Partiendo de dichos valores es posible determinar que un valor igual o mayor a 100 para el ICH es el que se espera mantener durante la perforación del pozo.

La ventaja con el HCI es que se facilita analizar y optimizar la velocidad de perforación en función de las propiedades del lodo, geometría del pozo y caudal de trabajo con adecuada limpieza del hueco, mitigando otros problemas operacionales.

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

La rotación de la tubería de perforación (RPM) tiene un papel importante en la eliminación de recortes en pozos desviados, especialmente en flujo laminar y de transición. El efecto de la rotación de la sarta se atribuye a tres razones principales, la primera es que los recortes son impulsados hacia la corriente de flujo de fluido, la segunda razón es que el movimiento de rotación ayuda a mejorar el aplanamiento del régimen de flujo, genera turbulencia, y la tercera razón es que la rotación de la tubería irrita los recortes del lecho.

6. Recomendaciones

Implementar el índice de limpieza propuesto HCI en un campo colombiano para fortalecer y afianzar su uso en las operaciones de perforación de los campos locales.

Se recomienda por medio del software ANSYS FLUENT, realizar simulación para analizar el impacto que tienen los indicadores de limpieza CCI y CCA sobre la velocidad de perforación.

Analizar el uso del índice de limpieza propuesto HCI para pozos horizontales y desviados, ya que en estos pozos tiende a facilitarse la formación de camas de recortes que dificultan la limpieza del pozo y dificultan la posibilidad de optimizar la velocidad de perforación.

Referencias Bibliográficas

Khamis, (2013). Optimización de los parámetros de perforación utilizando energía específica en tiempo real, Disertación.

Mahmoud, H., Hamza, A., Nasser, M. S., Hussein, I. A., Ahmed, R., & Karami, H. (2020). Hole cleaning and drilling fluid sweeps in horizontal and deviated wells: Comprehensive review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 186, 106748.
<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106748>

Mitchell, BJ, (1955). "Advanced Oil drill engineering", un libro de texto publicado por la sociedad de ingeniería petrolera.

Mohammed, M., Saudi A.; Rahul N. Gajbhiye, K.; Abdullah A., Meshari, A., and Mohammed B. **(2020). Automated Evaluation of Hole Cleaning Efficiency While drilling Improves Rate of Penetration. International Petroleum Technology Conference. IPTC-19809-MS**

Newitt, D. M, 1955, "Advanced Oil drill engineering", un libro de texto publicado por la sociedad de ingeniería petrolera.

al Rubaii, M. M. (2018). A New Robust Approach for Hole Cleaning to Improve Rate of Penetration. *All Days*. Published. <https://doi.org/10.2118/192223-ms>

Luo, Y., Bern, P., & Chambers, B. (1994). Simple Charts To Determine Hole Cleaning Requirements in Deviated Wells. *All Days*. Published. <https://doi.org/10.2118/27486-ms>

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

Castillejo, J. (2021). Curso limpieza de pozo e hidráulica de la perforación. Consejo Profesional de Ingeniería de Petróleos. Agosto 26, 2021, 9-12.

WALKER, S. & LI J., The Effects of Particle Size, Fluid Rheology, and Pipe Eccentricity on Cuttings Transport; Society of Petroleum Engineers: Houston, Texas, 2000.

THOMAS R,P, SOUTHERN and Others, Drillpipe Eccentricity Effect on Drilled Cuttings Behavior in Vertical Wellbores, 1982.

SILVA, M.A. and SHAH, S.N.: “Friction Pressure Correlations of Newtonian and Non-Newtonian Fluids Through Concentric and Eccentric Annuli,” Houston, TX, Abril, 2000.

OOMS, Deft U & KAMPMAN Reinhatz , Influence of Drillpipe Rotation and Eccentricity on Pressure Drop Over Pore Hole with Newtonian Liquid During Drilling, SPE, 2000.

MOHAMMADSALEHI M., MALEKZADEH N., Optimization of Hole Cleaning and Cutting Removal in Vertical, Deviated and Horizontal Wells; Iranian Central Oilfields Company (ICOFC), SPE, 2011.

IYOHU, A.W., 1980. Drilled-cuttings transport by non-Newtonian fluids through inclined, eccentric Annuli, PhD dissertation, University of Tulsa, Tulsa, OK Instituto Americano del Petróleo (API), Recomendaciones Para Los Cálculos De Hidráulica De Perforación, norma RP 13D, 2009.

HACIISLAMOGLU, M. & Cartalos, U.: Practical Pressure Loss Predictions in Realistic Annular Geometries,” Washintong, D:C.; Octubre 1992.

ENILARI G. Mojisola, Development And Evaluation Of Various Drilling Fluids For Slim-Hole Wells, Tesis Oklahoma, 2005.

IMPACTO DE LA LIMPIEZA DEL POZO EN LA TASA DE PERFORACION

- ARGILLIER, J.F, AUDIBERT, A., Janssen, M., Demoulin, A.: Performance of a New Biodegradable Ester Based Lubricant for Improving Drilling Operations with Water Based Muds,SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, Houston, Texas, 1997.
- Brown, Bern, and Weaver, BP Research Centre,” Cleaning Deviated Holes: New Experimental and Theoretical Studies”, 1985, SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, SPE- 18636-MS. DOI: 10.2118/18636-MS.
- Okrajni, Slavomir, and J. J. Azar. "The Effects of Mud Rheology On Annular Hole Cleaning in Directional Wells." SPE Drilling Engineering Vol.1. (04) (1986): 297-308. DOI: 10.2118/14178-PA.
- Sifferman and Becker, “Hole Cleaning in Full Scale Inclined Wellbores”, Spe Drilling Engineering, 1992, 1992, Copyright 1992, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, Spe-20422-Pa.DOI: 10.2118/20422-PA.
- Luo, Yuejin, P. A. Bern, and B. D. Chambers. "Simple Charts to Determine Hole Cleaning Requirements in Deviated Wells." SPE/IADC Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers, 1994. DOI: 10.2118/27486-MS.
- Larsen, T. I., A. A. Pilehvari, and J. J. Azar. "Development of a New Cuttings-Transport Model for High-Angle Wellbores Including Horizontal Wells." SPE Drilling & Completion 12.02 (1997): 129-136. DOI: 10.2118/25872-PA.
- Ozbayoglu, A. Saasen, M. Sorgun and K. Svanes, “Hole Cleaning Performance of Light-Weight Drilling Fluids During Horizontal Underbalanced Drilling”, Canadian International Petroleum Conference,2007,2007 Copyright 2007, Petroleum Society’s 8th Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Canada, Petsoc 2007-210. DOI: 10.2118/2007-210.