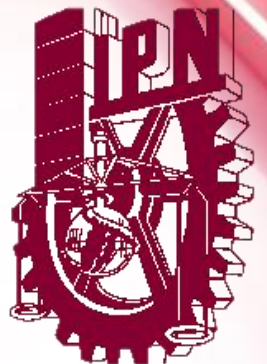


# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA UNIDAD TICOMÁN

## “GUÍA PRÁCTICA PARA EL CÁLCULO HIDRÁULICO Y LIMPIEZA DEL POZO”

*Seminario De Ingeniería De Fluidos de Control*





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**UNIDAD TICOMÁN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**SEMINARIO DE INGENIERÍA DE FLUIDOS DE CONTROL**

**GUÍA PRÁCTICA PARA EL CÁLCULO HIDRÁULICO Y  
LIMPIEZA DEL POZO**

**TRABAJO FINAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO PETROLERO**

**PRESENTAN:**

**EK ALVARADO EMMANUEL DEL JESUS**

**MAYA JASSO LOGGEN URIEL**

**SIXTOS PINEDA ALEXANDER**

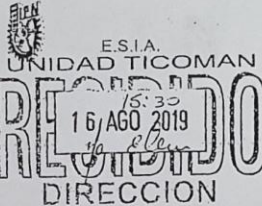
**ASESORA:**

**QUIM. ROSA DE JESÚS HERNÁNDEZ ÁLVAREZ**

**Ciudad de México, octubre de 2019**



Folio: DES/4298/2019



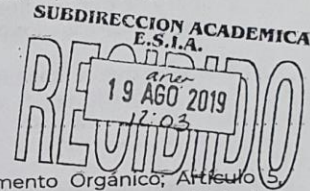
SECRETARÍA ACADÉMICA  
DIRECCIÓN DE EDUCACIÓN SUPERIOR

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"  
60 años de la Unidad Profesional Adolfo López Mateos  
70 Aniversario del CECyT No. 3 "Estanislao Ramírez Ruz"  
60 años de XEIPN Canal Ocozacoacoatlán  
60 Aniversario del CECyT No. 4 "Lázaro Cárdenas"

Asunto: Impartición de Seminario

Ciudad de México, a 12 de agosto de 2019

DR. ARTURO ORTIZ UBILLA  
DIRECTOR DE LA ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
Y ARQUITECTURA (ESIA), UNIDAD TICOMÁN  
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
PRESENTE



Con fundamento en el Artículo 44, Fracción VII del Reglamento Orgánico; Artículo 5, Fracción III del Reglamento General de Estudios; Artículo 12 del Reglamento de Titulación Profesional del Instituto Politécnico Nacional; en atención a su oficio DET/1424/2019, le comunico que se autoriza la impartición del Seminario de Actualización con Opción a Titulación:

### "INGENIERÍA DE FLUIDOS DE CONTROL"

Folio de Autorización:	DES/ESIA-TIC/S/001-13/2011-2019
Vigencia del seminario:	11 de abril de 2018 al 11 de abril de 2020
Duración:	150 horas.
Período de impartición:	Del 13 de agosto al 08 de octubre de 2019
Horario:	martes, miércoles y jueves de 09:00 a 15:00 horas.
Sede:	ESIA-TIC
Expositores:	Quím. Rosa de Jesús Hernández Álvarez, Ing. Manuel Torres Hernández e Ing. Rubén Miranda Arias.

Debiendo observar lo siguiente:

- Enviar la lista inicial oficial de participantes, firmada y sellada por el Coordinador del Seminario y el Subdirector Académico dentro de los primeros diez días hábiles posteriores a la fecha del inicio del seminario.
- Dar a conocer a los participantes el folio de autorización correspondiente, para trámites de titulación ante la Dirección de Administración Escolar.
- 

Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Edificio de la Secretaría Académica  
Av. Luis Enrique Erro s/n, col. Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México  
Conmutador 01 (55) 5729 6000 exts. 50521 y 50520 www.ipn.mx/des



2019  
CIUDAD DE MEXICO  
EMILIANO ZAPATA





EDUCACIÓN  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

SECRETARÍA ACADÉMICA  
DIRECCIÓN DE EDUCACIÓN SUPERIOR

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"  
60 años de la Unidad Profesional Adolfo López Mateos  
70 Aniversario del CECyT No. 3 "Estanislao Ramírez Ruiz"  
60 años de XEIPN Canal Once, orgulloosamente politécnico  
60 Aniversario del CECyT No. 4 "Lázaro Cárdenas"

- Al concluir el programa del seminario enviar la relación de asistencia, de evaluación final y de trabajos finales, en un plazo no mayor a 20 días hábiles, para la emisión de las constancias a los participantes.

Cabe señalar que tanto la información emitida para la autorización de vigencia, como los datos de los participantes utilizados en la emisión de constancias, está sustentada en los anexos adjuntos al oficio enviado por usted, por lo que solicito verificarla a detalle previamente a su trámite.

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE  
"La Técnica al Servicio de la Patria"



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
Dirección de Educación Superior

M. EN C. ROSALÍA MARÍA DEL CONSUELO TORRES BEZAURY  
DIRECTORA

c.c.p Dr. Jorge Toro González - Secretario Académico del IPN.  
Lic. Marisela Cabrera Rojas - Directora de Administración Escolar DAE.

T-13677

RMCTB/EGC/vymvn

Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Edificio de la Secretaría Académica  
Av. Luis Enrique Erro s/n, col. Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07730, Ciudad de México  
Conmutador 01 (55) 5729 6000 exts. 50521 y 50520 www.ipn.mx/des



2019  
EMILIANO ZAPATA

Autorización de obra

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
A. Presente


Bajo protesta de decir la verdad los que suscriben: **EK ALVARADO EMMANUEL DEL JESUS, MAYA JASSO LOGGEN URIEL, SIXTOS PINEDA ALEXANDER**, manifiestan ser autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada "**GUÍA PRÁCTICA PARA EL CÁLCULO HIDRÁULICO Y LIMPIEZA DEL POZO**", en adelante "**EL TRABAJO FINAL**" y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal de Derechos de Autor, otorgamos a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante "**EL IPN**", autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales (Publicación en Línea) "**EL TRABAJO FINAL**" por un período de 6 años contando a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a "**EL IPN**" de su terminación.

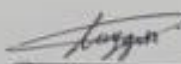
En virtud de lo anterior, "**EL IPN**" deberá reconocer en todo momento nuestra calidad de autores de "**EL TRABAJO FINAL**".


Adicionalmente, y en nuestra calidad de autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de "**EL TRABAJO FINAL**", manifestamos que el mismo es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de "**EL TRABAJO FINAL**" por lo que deslindamos de toda responsabilidad a "**EL IPN**" en caso de que el contenido de "**EL TRABAJO FINAL**" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumimos las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México, a 30 de octubre de 2019

Atentamente

  
\_\_\_\_\_  
**EK ALVARADO EMMANUEL  
DEL JESUS**

  
\_\_\_\_\_  
**MAYA JASSO LOGGEN  
URIEL**

  
\_\_\_\_\_  
**SIXTOS PINEDA  
ALEXANDER**



# ÍNDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>2</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO I. OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
1.1 Hidráulica de pozos.....	4
1.2 Limpieza de pozos.....	4
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
Propiedades reológicas y tixotrópicas que determinan la hidráulica y limpieza del pozo.....	5
2.1 Viscosidad .....	5
2.1.2 Viscosidad efectiva (VE) .....	5
2.1.3 Viscosidad aparente (VA).....	5
2.1.4 Viscosidad plástica (PV).....	5
2.2 Punto de cedencia .....	6
2.3 Esfuerzo cortante.....	6
2.4 Velocidad de corte .....	6
2.5 Índice de comportamiento de fluido (n).....	7
2.6 Factor de consistencia (K) .....	7
2.7 Numero de Reynolds (Re) .....	7
2.8 Densidad equivalente de circulación (ECD).....	8
2.9 Factor de fricción .....	8
2.10 Velocidad de penetración (ROP) .....	9





2.11 Hidráulica de pozos petroleros .....	9
2.12 Construcción de pozos petroleros .....	10
2.12.1 Perforación .....	10
2.12.2 Cementación .....	10
2.12.3 Terminación .....	11
2.13 Limpieza del pozo .....	11
2.14 Tipos de flujos.....	11
2.14.1 Flujo Tapón .....	11
2.14.2 Régimen laminar .....	12
2.14.3 Régimen turbulento .....	12
2.15 Velocidad de deslizamiento de los recortes .....	13
2.16 Índice de capacidad de acarreo .....	13
2.17 Concentración de recortes.....	13
2.18 Bombas.....	14
2.18.1 Bomba Tríplex .....	14
2.18.2 Bomba Dúplex.....	14
2.18.3 Embolada .....	14
2.18.4 Desplazamiento.....	15
2.18.5 Gasto.....	15
2.19 Relación del lodo de perforación en la hidráulica y limpieza del pozo .....	15
<b>CAPÍTULO III. ECUACIONES PARA DETERMINAR LAS PÉRDIDAS DE PRESIÓN .....</b>	<b>17</b>
3.1 Perdidas de presión en el equipo superficial .....	17
3.2 Perdidas de presión en la barrena .....	18
3.3 Perdidas de presión en la sarta .....	21





3.3.1 Tubería de perforación .....21

3.4 Espacio anular .....24

    3.4.1 Determinar la pérdida de presión en el espacio anular: .....25

3.5 Densidad Equivalente de Circulación (ECD) .....27

3.6 Limpieza del pozo .....28

    3.6.1 Velocidad de deslizamiento (Vs) .....28

    3.6.2 % de concentración de recortes por volumen .....31

    3.6.3 Concentración de recortes .....32

    3.6.4 Índice de capacidad de carga (CCI) .....33

**CAPÍTULO IV. EJEMPLO DE UN CASO PRÁCTICO PARA DETERMINAR LA HIDRÁULICA Y LIMPIEZA DEL POZO. .... 35**

    4.1 Pérdidas de presión en el equipo superficial .....36

    4.2 Pérdidas de presión en la barrena .....36

    4.3 Pérdidas de presión en la sarta .....37

        4.3.1 Tubería de perforación .....37

        4.3.2 Lastrabarrena .....42

    4.4 Espacio anular .....44

        4.4.1 Tubería de perforación y tubería de revestimiento .....44

    4.5 Hidráulica de barrena.....52

    4.6 Limpieza de pozo.....56

        4.6.1 Índice de capacidad de carga CCI .....60

**CONCLUSIÓN ..... 62**

**BIBLIOGRAFÍA ..... 63**







## RESUMEN

Tanto la hidráulica como la limpieza de pozos son una parte fundamental dentro de la industria petrolera, de estas depende el correcto acarreo de los recortes y, por ende, el cuidado del pozo, equipos y tuberías, lo que se traduce en grandes ahorros económicos, si se tiene un buen control de estas.

A lo largo de este trabajo nos familiarizaremos con conceptos fundamentales para entender la hidráulica y limpieza de pozos, de igual manera y en un sentido muy general, veremos algunas otras definiciones y conceptos relacionados con nuestro tema principal, como es el caso de bombas y etapas de perforación de un pozo.

Así mismo encontraremos una recopilación de fórmulas, empleadas en el cálculo de la hidráulica y limpieza del pozo, así como un caso práctico con la metodología correcta para emplearlas, explicando paso a paso la metodología a seguir para finalmente analizar un poco los resultados obtenidos y su interpretación práctica.



## ABSTRACT

Both the hydraulics and the cleaning of wells are a fundamental part within the oil industry, on these depend the correct carrying of the cuts and, therefore, the care of the well, equipment and pipes, which translates into great economic savings, if you have a good control of them.

Throughout this work we will familiarize ourselves with fundamental concepts to understand the hydraulics and cleaning of wells, in the same way and in a very general sense, we will see some other definitions and concepts related to our main topic, such as the case of pumps and stages of drilling a well.

We will also find a compilation of formulas, used in the calculation of hydraulics and cleaning of the well, as well as a practical case with the correct methodology to use them, explaining step by step the methodology to follow to finely analyze a little the results obtained and its practical interpretation.



## INTRODUCCIÓN

Este trabajo tiene como propósito tener el conocimiento y entendimiento teórico que rige una parte de la construcción de pozos, la hidráulica y la limpieza de los mismos.

La hidráulica de pozo se basa principalmente en obtener las diferentes pérdidas de presión que se presentan en el desarrollo de las etapas de construcción de un pozo a lo largo del sistema circulatorio como lo son; conexiones superficiales, tuberías de perforación, producción, barrena, espacio anular entre las mismas anteriormente mencionadas y el agujero descubierto en caso de no existir aún revestimiento en este.

A lo largo de este trabajo se mostrará la forma general de estimar y conocer los valores requeridos por la hidráulica de pozos con el fin de obtener un valor que represente un cambio en la densidad equivalente de circulación (ECD) del lodo de perforación que se obtuvo con anterioridad en una ventana operativa, previniendo de esta forma un posible problema a futuro.

La limpieza de pozos es una parte fundamental tanto para la hidráulica de perforación como para el mantenimiento del mismo pozo, desde las bombas, hasta las tuberías, inclusive la formación misma; por ello saber cómo obtenerlo, dicho valor resulta indispensable en la industria petrolera, a lo largo de este trabajo se mostraran distintos caminos para obtener una estimación precisa de este valor, con el fin de conocer si tenemos o no una buena limpieza del pozo, y como consecuencia, dependiendo si esta es buena o no, implementar mejoras ya sea en las propiedades reológicas y tixotrópicas del fluido de perforación o en el sistema de bombeo para mejorar la hidráulica, para mantener las condiciones óptimas de operación.



## CAPÍTULO I. OBJETIVOS

### 1.1 Hidráulica de pozos

Conocer y definir los parámetros que intervienen en el comportamiento hidráulico del pozo como son las propiedades densificantes como lo es la densidad equivalente de circulación (ECD) del fluido de perforación. Los parámetros siguientes se evalúan en el análisis que influye en la hidráulica del pozo:

- ✚ Determinar las pérdidas de presión para establecer la densidad equivalente de circulación (EDC).
- ✚ Evaluar los efectos de los cambios del fluido sobre el desempeño hidráulico del sistema.
- ✚ Optimizar la hidráulica para un mejor desempeño de la perforación en la tasa de penetración (ROP)

### 1.2 Limpieza de pozos

El objetivo de la limpieza de pozos es el de evaluar los efectos de remoción, acarreo y concentración de los recortes generados durante la perforación mediante el análisis de los siguientes requisitos y así;

- ✚ Asegurar una buena limpieza en el espacio anular.
- ✚ Evitar la erosión del pozo debido al flujo turbulento en el espacio anular.
- ✚ 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.
- ✚ Evitar correr la tubería en el pozo demasiado rápido, para no provocar pérdidas de circulación por surgencia.



## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### Propiedades reológicas y tixotrópicas que determinan la hidráulica y limpieza del pozo.

#### 2.1 Viscosidad

“Se define la viscosidad como la propiedad que tienen los fluidos de ofrecer resistencia al movimiento relativo de sus moléculas. También se suele definir la viscosidad como una propiedad de los fluidos que causa fricción, esto da origen a la pérdida de energía en el flujo fluido.” (Speers, 2014).

##### 2.1.2 Viscosidad efectiva (VE)

“La viscosidad de un fluido no newtoniano cambia con el esfuerzo de corte. La viscosidad efectiva ( $\mu_e$ ) de un fluido es la viscosidad de un fluido bajo condiciones específicas. Estas condiciones incluyen la velocidad de corte, la presión y la temperatura. Expresada en [cP].” (Speers, 2014).

##### 2.1.3 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).

##### 2.1.4 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).

## 2.2 Punto de cedencia

“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 ft<sup>2</sup>].” (Barnes, 2015).

## 2.3 Esfuerzo cortante

“La fuerza por unidad de superficie requerida para mantener una velocidad constante de movimiento de un fluido. Matemáticamente, el esfuerzo cortante puede definirse como:  $\tau = F/A$ .” (Barnes, 2015).

Dónde:

$\tau$  = esfuerzo cortante.

F = fuerza de corte o de cizalladura.

A= Superficie en la que actúa la fuerza de corte o de cizalladura.

## 2.4 Velocidad de corte

“La velocidad de corte es el índice al que cambia la velocidad a la que una capa de fluido pasa sobre una capa adyacente. Como ejemplo, consideremos que un fluido se coloca entre dos placas paralelas que están a 1,0 cm de distancia; la placa superior



se mueve a una velocidad de 1,0 cm/s y la placa inferior está fija.” (Schlumberger, 2017). “La capa del fluido en la placa inferior no se mueve y la capa más próxima a la placa superior se mueve a 1,0 cm/s. A medio camino entre las placas, una capa se mueve a 0,5 cm/s.” (Schlumberger, 2017).

### **2.5 Índice de comportamiento de fluido (n)**

“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).

### **2.6 Factor de consistencia (K)**

“Indica la consistencia del fluido, dado que el aumento de “k” indica un aumento en la concentración de solidos 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).

### **2.7 Numero de Reynolds (Re)**

“Es un número adimensional utilizado en la Mecánica de Fluidos (entre otras aplicaciones) y permite caracterizar el movimiento de un fluido, es decir, si se trata de un flujo laminar, flujo transicional o de un flujo turbulento.” (Martinez, 2007). “Además indica la importancia relativa de la tendencia del flujo hacia un régimen turbulento respecto de uno laminar y la posición de este estado dentro de una longitud determinada.” (Martinez, 2007).

$$\text{Re} = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho * D * V}{\mu} = \frac{V * D}{\nu}$$



**Dónde:**

$\rho$ = Densidad del fluido.

$V$ = Velocidad del fluido.

$\nu$ = Viscosidad cinemática del fluido.

$\mu$ = Viscosidad dinámica del fluido.

$D$ = Diámetro interno de la tubería.

## 2.8 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 Rodriguez, & Jimenes y Galvan , 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:

$$ECD (ppg) = \frac{APL (psi)}{0.052 \times TVD (ft)} + MW (ppg)$$

## 2.9 Factor de fricción

“Es un parámetro adimensional que se utiliza en dinámica de fluidos para calcular la pérdida de carga en una tubería debido a la fricción.” (De la Torre Ramos, 2017).





## 2.10 Velocidad de penetración (ROP)

“Es la velocidad con la que la barrena puede romper la roca que se encuentra por debajo de la misma y de ese modo profundizar el pozo. Esta velocidad se indica habitualmente en unidades de pies por hora o metros por hora.” (De la Torre, Ramos, Ramos Rodriguez, & Jimenes y Galvan , 2017).

“La velocidad de penetración siempre debe ser controlada a fin de dar al fluido tiempo suficiente para eliminar los recortes, ya que una carga de recortes aumenta la densidad del fluido en el espacio anular, lo que genera una mayor pérdida de presión en la circulación y por lo tanto una menor velocidad de flujo.” (B AND H, 2014).

“Las altas velocidades de penetración generan un mayor volumen de residuos, causando una gran concentración de recortes en el fondo del pozo. Si la concentración de recortes se excede, el fluido de perforación podría no limpiar correctamente el agujero del pozo.” (keith, 205).

## 2.11 Hidráulica de pozos petroleros

“La perforación de pozos petroleros requiere de una hidráulica que cumpla con los objetivos de mejorar la eficiencia de la barrena y proveer un eficiente acarreo de los recortes de formación a la superficie.” (De la Torre Ramos, 2017). “El sistema hidráulico está integrado por el equipo superficial, la sarta de perforación, y el espacio anular. El cálculo hidráulico en este sistema define el diámetro óptimo de las toberas de la barrena, con el cual se obtendrá la potencia hidráulica del flujo del fluido de perforación que promueva la óptima remoción de recortes, incremento en la velocidad de penetración y en la vida de la barrena.” (De la Torre Ramos, 2017).



## 2.12 Construcción de pozos petroleros

“Es una perforación efectuada en el subsuelo con barrenas de diferentes diámetros y con revestimiento de tuberías, a diversas profundidades, llamadas etapas de perforación, para la prospección o explotación de yacimientos petroleros.” (De la Torre, Ramos, Ramos Rodriguez, & Jimenes y Galvan , 2017).

La construcción de pozos se divide en tres etapas principales:

### 2.12.1 Perforación

“Es el proceso de construir un agujero en el subsuelo para explorar y/o para la extracción de recursos petrolíferos, mediante la rotación de la sarta de perforación y la aplicación de una fuerza de empuje en el fondo, utilizando una barrena.” (Transocean, 2012).

### 2.12.2 Cementación

“Es la operación efectuada en un pozo petrolero donde se mezcla y desplaza una lechada de cemento entre la tubería de revestimiento y la formación expuesta del agujero o revestidores anteriores con el fin de cumplir con los siguientes objetivos:” (schlumberger, 2015).

- ✓ Crear un aislamiento de zonas productoras.
- ✓ Formaciones de alta o baja presión y acuíferos.
- ✓ Proveer soporte al revestidor dentro del pozo.
- ✓ Proteger al revestidor del proceso de corrosión.
- ✓ Proteger el hoyo de un posible colapso.
- ✓ Formar un sello hidráulico entre la T.R. y la formación.



### 2.12.3 Terminación

“Se entiende por terminación a las actividades encaminadas a explotar los yacimientos, a través de las tuberías de revestimiento de explotación, para dejarlo produciendo por el método más conveniente.” (De la Torre, Ramos, Ramos Rodriguez, & Jimenes y Galvan , 2017).

### 2.13 Limpieza del pozo

“Una función importante del fluido de perforación consiste en transportar los recortes de la perforación desde el fondo del pozo hasta la superficie, donde pueden ser removidos.” (De la Torre Ramos, 2017). Una limpieza de pozo insuficiente puede ocasionar diferentes problemas graves, incluyendo:

- ✓ Elevado arrastre y torque.
- ✓ Menor tasa de penetración.
- ✓ Atascamiento de tubería.
- ✓ Dificultades para correr la tubería de revestimiento.
- ✓ Fallas en la cementación primaria.

### 2.14 Tipos de flujos

“La forma del perfil del flujo anular, depende del régimen de flujo que hay en este. Este régimen de flujo es un tipo de relación entre la presión y la velocidad. Hay tres tipos de regímenes de flujo: Flujo tapo, laminar y turbulento.” (Martinez, 2007).

#### 2.14.1 Flujo Tapón

“La presión es suficiente para mover el fluido (muy parecido a la forma en que sale la crema dental cuando se aprieta el tubo). La presión aplicada supera el punto cedente



verdadero, pero es menor al punto cedente falso o punto de Bingham. El fluido en flujo tapón tiene gran capacidad de transporte y es característico de los fluidos no dispersos.” (Escobar, Macualo, 2015).

### **2.14.2 Régimen 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. Suele presentarse en los extremos finales de los laterales de riego y en micro tubos de riego.” (Martinez, 2007).

“En tuberías de sección circular, si hacemos un corte transversal, las capas de igual velocidad se disponen de forma concéntrica, con  $v > 0$  junto a las paredes de la tubería y velocidad máxima en el centro.” (Martinez, 2007).

“Corresponde el régimen laminar a bajos valores del número de Reynolds y suele darse a pequeñas velocidades, en tubos con pequeño diámetro y con fluidos muy viscosos (aceites). En estas condiciones, las fuerzas viscosas predominan sobre las de inercia.” (Martinez, 2007).

### **2.14.3 Régimen 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.” (Clayton, T., Donald, E. , & John, A. , 2010). “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.” (Clayton, T., Donald, E. , & John, A. , 2010).



### 2.15 Velocidad de deslizamiento de los recortes

“La capacidad del fluido para limpiar el pozo depende de la reología y la densidad de ese fluido, su caudal y el tamaño de los recortes. Para una partícula de cualquier tamaño (recorte), el movimiento hacia arriba de esa partícula con el flujo del fluido será parcialmente negado por el efecto de la gravedad que favorece el asentamiento de las partículas.” (Adams, 2012).

“La tasa de asentamiento se suele denominar velocidad de deslizamiento ( $V_s$ ). Al comparar  $V_s$  con la velocidad anular ( $V_a$ ) en el 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).

### 2.16 Índice de capacidad de acarreo

“El índice de capacidad de carga o acarreo se ha desarrollado para describir la limpieza de los pozos. Se espera una buena limpieza del pozo cuando el CCI es igual o mayor que 1, los recortes son afilados y grandes.” (Reyes, 2014).” Cuando el CCI tiene un valor de 0.5, los recortes son redondeados y generalmente muy pequeños. Cuando el CCI tiene un valor menor a 0.3, los recortes pueden ser de tamaño de grano.” (Reyes, 2014).

- “Si el CCI es igual o menor a 0.5, la limpieza del pozo es pobre.” (keith, 205).
- “Si el CCI es igual o mayor a 1, la limpieza del pozo es buena.” (keith, 205).

### 2.17 Concentración de recortes

“Cuando se perfora un pozo, la tasa de penetración puede generar un volumen mayor de recortes que el que se puede sacar del pozo en una circulación. Esto conduce a la acumulación de partículas en el fluido de perforación en la región anular. Dependiendo

de las formaciones perforadas, un Ca > 6% a 8% en volumen puede conducir a problemas de limpieza del pozo.” (Energy API, 2012).

## **2.18 Bombas**

“Una bomba de lodo es un dispositivo mecánico diseñado para desplazar un fluido de naturaleza viscosa, de alta densidad y viscosidad variable; a través de un sistema de compartimientos hidráulicos y tuberías.” (De la Torre, Ramos, Ramos Rodriguez, & Jimenes y Galvan , 2017).

### **2.18.1 Bomba Tríplex**

“Las bombas de lodo tríplex son aplicables en la perforación que requiere alta presión de la bomba, tales como la extracción de petróleo. Estas bombas trabajan mediante la reducción del volumen del fluido, que se descarga para producir la presión suficiente para fomentar el flujo.” (Barron, Gonzalez , 2014). “Se compone de tres pistones: el pistón medio ejerce una mayor presión en el cigüeñal en comparación con los otros dos pistones externos. Sin embargo, la aplicación de presión excesiva, debida a una alta carga del pistón, resulta en el agrietamiento o en el fracaso del cigüeñal.” (Barron, Gonzalez , 2014).

### **2.18.2 Bomba Dúplex**

“Las bombas de lodo dúplex son bombas que se utilizan comúnmente en plataformas de remediación y tiene dos émbolos o pistones y cuya función es garantizar la circulación del lodo de perforación o el suministro de líquido desde el sistema de limpieza de lodo a la parte inferior del pozo.” (PEMEX, 2013).

### **2.18.3 Embolada**

“Se define como embolada, el movimiento de los pistones de la bomba de lodo por cada ciclo, considerándose como ciclo completo el avance y retroceso del pistón de y hasta su posición inicial.” (PEMEX, 2013).

#### **2.18.4 Desplazamiento**

“Defínase como desplazamiento a la cantidad de volumen de fluido impulsado por la bomba en cada embolada. Este volumen depende directamente del diámetro interior de la camisa o linner y de la distancia de recorrido del pistón en el interior de la misma. Las unidades de ingeniería usadas son litros por embolada (l/emb).” (De la Torre Ramos, 2017).

#### **2.18.5 Gasto**

“Es el desplazamiento que efectúan los pistones de la bomba en una unidad de tiempo. Depende de la velocidad con que se mueven los dispositivos de succión o admisión e inyección o descarga.” (PEMEX, 2013). “Las unidades más usadas son: litros por minuto (l/min), Galones por minuto (gal/min), metros cúbicos por minuto (m<sup>3</sup>/min).” (De la Torre, Ramos, Ramos Rodriguez, & Jimenes y Galvan , 2017).

### **2.19 Relación del lodo de perforación en la hidráulica y limpieza del pozo**

“Tiene una relación crítica en aspectos como la hidráulica y limpieza de un pozo, ya que actúa como un medio de transporte de recortes y gas, permitiendo así observar en superficie lo que está sucediendo en el interior del pozo, sino que, además las propiedades del lodo determinan la efectividad del mismo para darle al pozo una buena limpieza y efectuar una buena hidráulica.” (Barnes, 2015).

“Muchas variables juegan un rol importante en la eficiencia de limpieza del agujero, incluyendo el peso sobre la barrena y velocidad de rotación, tipo de barrena, tasa de



flujo, velocidad de chorro, presión diferencial, tamaño de las toberas, localización y distancia del frente de roca, volumen de sólidos, etc.” (King, 2011).

Efectivamente, el fluido de perforación transmite potencia hidráulica a la barrena. La tasa de circulación del fluido de perforación debería tener la potencia óptima para limpiar el agujero delante de la barrena permitiendo una perforación eficiente. La potencia hidráulica usada en la barrena determina el grado de optimización de la hidráulica, ya sea para limpieza del agujero o para alcanzar un flujo laminar en el anular. (Reyes, 2014).





## CAPÍTULO III. ECUACIONES PARA DETERMINAR LAS PÉRDIDAS DE PRESIÓN

### 3.1 Pérdidas de presión en el equipo superficial

Determinar la pérdida de presión en el sistema de superficie:

$$\Delta P_{SC} = (CSC)(MW) \left( \frac{Q}{100} \right)^{1.86}$$

Dónde:

$P_{SC}$  = Pérdida de presión en el sistema de superficie (psi)

$CSC$  = Constante para conexiones de superficie (adim)

$Q$  = Gasto de la bomba (gpm)

$MW$  = Peso del lodo (ppg)

El valor de CSC está determinado de acuerdo a las combinaciones del equipo superficial que representa una longitud y un diámetro equivalente de la tubería de perforación, como se muestra en la siguiente tabla:



Surface System Cases					
Case	Standpipe (ft. × ID in.)	Hose (ft. × ID in.)	Swivel (ft. × ID in.)	Kelly (ft. × ID in.)	$C_{SC}$
1	40.0 × 3.0	45.0 × 2.0	4.0 × 2.0	40.0 × 2.25	1.00
2	40.0 × 3.5	55.0 × 2.5	5.0 × 2.5	40.0 × 3.25	0.36
3	45.0 × 4.0	55.0 × 3.0	5.0 × 2.5	40.0 × 3.25	0.22
4	45.0 × 4.0	55.0 × 3.0	6.0 × 3.0	40.0 × 4.00	0.15
5	100.0 × 5.0	85.0 × 3.5	22.0 × 3.5		0.15

Ref: Table 4 of API RP 13D, June, 2006, p. 28.

### 3.2 Pérdidas de presión en la barrena

En general, cuando se utiliza entre el 50% y el 65% de la presión superficial en la barrena, se obtiene normalmente la hidráulica adecuada.

Determinar la pérdida de presión en la barrena (psi):

$$\Delta P_b = \frac{156.5(Q^2)(MW)}{[(D_{j1}^2) + (D_{j2}^2) + (D_{j3}^2) + \dots + (D_{jn}^2)]^2}$$

Dónde:

$D_j$  = Diámetro de las toberas en la barrena en 32nds de pulgada

$MW$  = Peso del lodo (ppg)

$Q$  = Gasto de salida de la bomba (gpm)

Determinar la velocidad anular (ft/min):



$$AV = \frac{24.5 \times Q}{D_h^2 - D_p^2}$$

Calcular la pérdida de presión en el flujo de la tobera (psi):

$$Pb = \frac{156.5 * Q^2 * MW}{((N1)^2 + (N2)^2 + (N3)^2)^2}$$

Calcular los caballos de fuerza hidráulica en la barrena (HP):

$$HHPb = \frac{Q * Pb}{1714}$$

Calcular el HHPb por pulgada cuadrada en el área de la barrena:

$$\frac{HHPb}{sq.in.} = \frac{HHPb * 1.27}{bit\ size^2}$$

Determinar el % de la pérdida de presión en la barrena:

$$\%psib = \frac{Pb}{surface, psi} * 100$$

Calcular el caballaje hidráulico total del sistema circulante:



$$SysHHP = \frac{surface, psi * Q}{1714}$$

Calcular la velocidad de chorro en la barrena (ft/s):

$$Vn = \frac{417.2 * Q}{(N1)^2 + (N2)^2 + (N3)^2}$$

Calcular la fuerza de impacto en la barrena (lb):

$$IF = \frac{(MW)(Vn)(Q)}{1930}$$

Calcular la fuerza de impacto por pulgada cuadrada del área de la barrena (lb/pg<sup>2</sup>):

$$\frac{IF}{sq.in.} = \frac{IF * 1.27}{bit size^2}$$

Dónde:

*N = Diámetro de las toberas en la barrena en 32nds de pulgada*

*Ps = Presión de superficie (surface)(psi)*

*Bs = Tamaño de la barrena (bit size)(in)*



### 3.3 Perdidas de presión en la sarta

Cabe destacar que estas ecuaciones se realizan de manera puntual y para cada intervalo o sección de tubería de interés, empleando las mismas ecuaciones, variando los diámetros, por ejemplo, dependiendo del tramo o sección a analizar.

#### 3.3.1 Tubería de perforación

Determinar el descenso de velocidad del fluido en la tubería (ft/s):

$$V_p = \frac{(0.408)(Q)}{D_{IDp}^2}$$

Determinar el valor n para flujo en tubería:

$$n_p = 3.32 \log\left(\frac{\theta 600}{\theta 300}\right)$$

$$\theta 300 = PV + YP$$

$$\theta 600 = \theta 300 + PV$$

Determinar el valor K del fluido en tubería:

$$K_p = \frac{5.11(\theta 600)}{1022^{n_p}}$$



Determinar la viscosidad eficiente en tubería (cP):

$$\mu_{ep} = 100(K_p) \left[ \frac{96(V_p)}{D_{IDp}} \right]^{n_p-1}$$

Determinar el número de Reynolds:

$$Re_p = \frac{928(v_p)(D_{IDp})(MW)}{(\mu_{ep}) \left[ \frac{3n_p + 1}{4n_p} \right]^{n_p}}$$

Determinar el número de Reynolds para cambio de flujo laminar:

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

Determinar el número de Reynolds para cambio de flujo turbulento:

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

Donde:

$D_{IDp}$  = Diámetro de tubería (in)

$MW$  = Peso del lodo (ppg)

$Q$  = Gasto de salida de la bomba (gpm)



Determinar el tipo de flujo y el factor de fricción:

Si  $Re_p < Re_T$  calcular el factor de fricción para flujo laminar:

$$f_p = \frac{16}{Re_p}$$

Si  $Re_p > Re_T$  calcular el factor de fricción para flujo turbulento:

$$f_p = \frac{((\log(n_p) + 3.93)/50)}{\frac{([1.75 - \log(n_p)])}{7} Re_p}$$

Si  $Re_L < Re_p < Re_T$  calcular el factor de fricción para flujo transicional:

$$f_p = \left( \frac{Re_p - Re_L}{800} \right) \left( \frac{((\log(n_p) + 3.93)/50)}{\frac{([1.75 - \log(n_p)])}{7} Re_p} - \frac{16}{Re_L} \right) + \frac{16}{Re_L}$$

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



$$\Delta P_{pl} = \frac{(f_p)(V_p^2)(MW)}{25.8(D_{IDp})} (L)$$

Determinar la pérdida de presión total en la sarta (psi):

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

### 3.4 Espacio anular

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

$$V_a = \frac{(0.408)(Q)}{\left((D_h^2) - (D_p^2)\right)}$$

Determinar el valor n para flujo en el espacio anular:

$$n_a = 0.5 \log \left( \frac{\theta 300}{\theta 3} \right)$$

Determinar el valor k en el espacio anular:





$$K_a = \frac{5.11(\theta 300)}{511^{n_a}}$$

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

$$\mu_{ea} = 100(K_a) \left[ \frac{144(V_a)}{D_h - D_p} \right]^{n_a - 1}$$

### 3.4.1 Determinar la pérdida de presión en el espacio anular:

Determinar el número de Reynolds:

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

Determinar el número de Reynolds para cambio de flujo laminar:

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

Determinar el número de Reynolds para cambio de flujo turbulento:

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

Dónde:



$D_h =$  Diámetro del pozo ó ID del casing (in)

$D_p =$  Diámetro externo de la tubería (in)

$Q =$  Gasto de salida de la bomba (gpm)

$MW =$  Peso del lodo (ppg)

Determinar el tipo de flujo y el factor de fricción:

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

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

$$f_a = \frac{\left( \frac{\log(n_a) + 3.93}{50} \right)}{\frac{([1.75 - \log(n_a)])}{7}} Re_a$$

Sí  $Re_{La} < Re_a < Re_T$  calcular el factor de fricción para flujo transicional:

$$f_a = \left( \frac{Re_a - Re_L}{800} \right) \left( \frac{\left( \frac{\log(n_a) + 3.93}{50} \right)}{\frac{([1.75 - \log(n_a)])}{7}} \right) + \frac{24}{Re_L}$$

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



$$\Delta P_{pl} = \frac{(f_a)(V_a^2)(MW)}{25.8(D_h - D_p)} (L)$$

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

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

### 3.5 Densidad Equivalente de Circulación (ECD)

Determinar la densidad equivalente de circulación (ECD)

Calcular la pérdida total de presión en el espacio anular ( $P_{aT}$ ) en psi, sumando las caídas de presión individuales calculadas para cada intervalo.

$$ECD = \frac{P_{eaT}}{(0.052)(TVD)} + MW$$

Dónde:

$ECD$  = Densidad equivalente de circulación (ppg)

$P_{eaT}$  = Presión total en el espacio anular (psi)

$TVD$  = Profundidad vertical verdadera (ft)

$MW$  = Peso del lodo (ppg)



## 3.6 Limpieza del pozo

### 3.6.1 Velocidad de deslizamiento (Vs)

Para fines prácticos en este apartado trataremos 3 enfoques distintos para el cálculo de la velocidad de deslizamiento, los cuales nos serán útiles dependiendo de la información con la que contemos o podamos obtener.

#### 3.6.1.1 Enfoque 1 para Vs

A partir del análisis en el espacio anular: Utilizar la  $V_a$ ,  $n_a$ ,  $k_a$ ,  $\mu_a$ , para determinar el tipo de flujo en la tubería.

Calcular la tasa de cizalladura de la partícula (Particle cutting shear rate) (seg-1):

$$\gamma_B = \frac{186}{D_c \sqrt{MW}}$$

Calcular el esfuerzo de corte desarrollado por la partícula (lb/100 ft<sup>2</sup>):

$$\tau_p = 7.9 \sqrt{T(20.8 - MW)}$$

Calcular la velocidad de corte desarrollada por la partícula (seg-1):



$$\gamma_{sp} = \left( \frac{\tau_p}{k_a} \right)^{\left( \frac{1}{n_a} \right)}$$

Dónde:

$D_c$  = Diámetro de la partícula (in)

$T$  = Espesor o grosor de partícula (in)

Comparar  $\gamma_{sp}$  con  $\gamma_B$  para determinar la ecuación a utilizar en el cálculo de la velocidad de deslizamiento de recortes (ft/min):

$\gamma_{SB} < \gamma_B$  ;  $V_s$  para flujo laminar

$$V_s = (1.22)(\tau_p) \sqrt{\frac{(\gamma_{SB})(D_c)}{\sqrt{MW}}}$$

$\gamma_{SB} > \gamma_B$  ;  $V_s$  para flujo turbulento

$$V_s = \frac{(16.62)(\tau_p)}{\sqrt{MW}}$$

### 3.6.1.2 Enfoque 2 para $V_s$

Determinar la velocidad anular (ft/min):



$$VA = \frac{24.5 \times Q}{D_h^2 - D_p^2}$$

Determinar la velocidad de deslizamiento de recortes (ft/min):

$$V_s = 0.45 \left( \frac{PV}{(MW)(Dc)} \right) \left[ \sqrt{\frac{36,800}{\left( \frac{PV}{(MW)(Dc)} \right)^2} \times (Dc) \left( \frac{DenP}{MW} - 1 \right) + 1} - 1 \right]$$

Dónde:

*DenP* = Densidad de la partícula (ppg)

*PV* = Viscosidad plástica (cP)

*Dh* = Diámetro de pozo o interno del casing (in)

*Dp* = Diámetro externo del casing (in)

*Dc* = Diámetro de la partícula (in)

*VA* = Velocidad anular (ft/min)

### 3.6.1.3 Enfoque 3 para *Vs*

Determinar *n*:

$$n = 3.32 \log \left( \frac{\theta 600}{\theta 300} \right)$$

Determinar *k*:



$$K = \frac{(\theta 300)}{511''}$$

Determinar la velocidad anular (ft/min):

$$VA = \frac{24.5 \times Q}{D_h^2 - D_p^2}$$

Determinar la viscosidad del lodo (cP):

$$\mu = \left( \frac{(2.4)(Va)}{(D_h - D_p)} * \frac{2n + 1}{3n} \right)^n * \left( \frac{200K(D_h - D_p)}{(Va)} \right)$$

Determinar la velocidad de deslizamiento de recortes (ft/min):

$$V_s = \frac{(DenP - MW)^{0.667} * 175 * Dc}{MW^{0.333} * \mu^{0.333}}$$

### 3.6.2 % de concentración de recortes por volumen

Determinar la velocidad de ascenso neta de transporte de partículas o recortes:



$$NPT(ft/min) = V_A - V_S$$

Determinar el tiempo de transporte del intervalo:

$$ITT(min) = long.\ intervalo \div (NPT)$$

Determinar el tiempo anular de transporte:

$$ATT(min) = \sum ITT$$

Determinar la eficiencia de transporte neta de recortes en el espacio anular (%):

$$NTE = \frac{V_A - V_S}{V_A} (100)$$

### 3.6.3 Concentración de recortes

Calcular el volumen de recortes en el espacio anular basado en el ritmo de penetración ROP (%)

$$C_a = \frac{(D_{bit}^2)(ROP)}{448.4(Q) \left(\frac{NTE}{100}\right)} (100)$$





Determinar el peso efectivo del fluido que resulta de la acumulación de recortes en el espacio anular con apoyo de la gravedad específica de los recortes, (ppg):

$$\rho_a = (SGc)(8.34) \left( \frac{Ca}{100} \right) + MW \left( 1 - \frac{Ca}{100} \right)$$

Calcular la velocidad máxima de penetración necesaria para limitar el peso del lodo en el espacio anular y evitar la pérdida de circulación (ft/hr):

$$ROP_x = \frac{(Q)(Fg - \rho_a)}{(D_h^2)[(SGc)(0.0057) - (FG)(0.00068)]}$$

Calcular la velocidad de penetración requerida para mantener un cierto % de volumen de recortes en el espacio anular suponiendo que el 100% de recortes están siendo transportados en el espacio anular.

$$ROP_M = \frac{\left( \frac{Ca}{100} \right) (Q)}{\left( \frac{(D_h^2)}{1470} \right) \left( 1 - \frac{Ca}{100} \right)}$$

### 3.6.4 Índice de capacidad de carga (CCI)

Determinar n según el modelo de Herschel-Bulkley:

$$n_{HB} = 3.32 \log_{10} \frac{(2(PV) + (YP))}{(PV + YP)}$$

Determinar K según el modelo HB:

$$K_{HB} = (511^{1-n_{HB}})(PV + YP)$$

Calcular el índice de acarreo (adim):

$$CCI = \frac{(MW)(K_{HB})(V_a)}{400,000}$$

Dónde:

$$YP = \text{Punto de cedencia} \left( \frac{lb}{100ft^2} \right)$$

$$PV = \text{Viscosidad plástica (cP)}$$

$$V_a = \text{Velocidad anular} \left( \frac{ft}{min} \right)$$

- ✚ Si el CCI es igual o menor a 0.5, la limpieza del pozo es pobre.
- ✚ Si el CCL es igual o mayor a 1, la limpieza del pozo es buena.



## CAPÍTULO IV. EJEMPLO DE UN CASO PRÁCTICO PARA DETERMINAR LA HIDRÁULICA Y LIMPIEZA DEL POZO.

Datos:

- ✚ Peso del lodo = 12.0 ppg
- ✚ Gravedad específica de los sólidos = 3.82
- ✚ Viscosidad plástica = 26 lb/100 ft<sup>2</sup>
- ✚ Umbral de fluencia plástica = 14lb/100 ft<sup>2</sup>
- ✚ Lectura  $\theta_3$  (resistencia de gel) = 8lb/100 ft<sup>2</sup>
- ✚ Diámetro de barrena = 9 7/8 in (toberas de 3 x 12/32 in)
- ✚ Longitud del agujero descubierto = 3000 ft
- ✚ Diámetro de TR = 10 3/4 in (45.5 lb/ft., ID = 9.950 in)
- ✚ Longitud de TR (medida) = 12,000 ft. (TVD = 11,500 ft)
- ✚ Diámetro de la tubería de perforación = 5.0 in. (19.5 lb/ft., ID= 4.276 in.)
- ✚ Diámetro de la tubería de perforación = 8.0 in. (147 lb/ft., ID = 3.0in.)
- ✚ Longitud de la tubería de perforación = 650 ft.
- ✚ Salida de la bomba = 400 gpm
- ✚ Presión de la bomba = 2950 psi
- ✚ Combinación del sistema superficial = 4 (CSC = 0.15)
- ✚ Ritmo de penetración = 50 ft/hr
- ✚ Densidad de la partícula = 22.0 ppg
- ✚ Diámetro de la partícula = 0.25 in
- ✚ Gradiente de fractura = 15.0 ppg

Para el cálculo de hidráulica se procede a obtener las caídas de presión en conexiones superficiales, barrena, sarta y espacio anular.



#### 4.1 Perdidas de presión en el equipo superficial

$$\Delta P_{SC} = (CSC)(MW) \left( \frac{Q}{100} \right)^{1.86}$$

$$\Delta P_{SC} = (0.15)(12ppg) \left( \frac{400gpm}{100} \right)^{1.86}$$

$$\Delta P_{SC} = 23.72psi$$

#### 4.2 Perdidas de presión en la barrena

$$\Delta P_b = \frac{156.5(Q^2)(MW)}{[(D_{j1}^2) + (D_{j2}^2) + (D_{j3}^2) + \dots + (D_{jn}^2)]^2}$$

$$\Delta P_b = \frac{156.5(400gpm^2)(12ppg)}{[(12^2) + (12^2) + (12^2)]^2}$$

$$\Delta P_{bit} = 1610.08psi$$



### 4.3 Perdidas de presión en la sarta

El procedimiento para la obtención de las caídas de presión en sarta consiste primeramente en seccionar la misma por medio de los diferentes diámetros que presente.

#### 4.3.1 Tubería de perforación

Primero se determina el descenso de velocidad del fluido en la tubería;

$$V_p = \frac{(0.408)(Q)}{D_{IDp}^2}$$

$$V_p = \frac{(0.408)(400\text{gpm})}{4.276^2}$$

$$V_p = 8.92 \text{ ft/s}$$

Calcular el valor de  $n$  adimensional para la tubería que tiene que ver con la reología del fluido y consta de las lecturas del viscosímetro a 600 y 300 revoluciones.

$$n_p = 3.32 \log\left(\frac{\theta_{600}}{\theta_{300}}\right)$$

Podemos observar que en los datos del problema no se cuenta con lectura a 300 y 600 revoluciones entonces recordando se tiene que la viscosidad plástica y el umbral de fluencia plástica, su sumatoria es igual a la lectura buscada de 300 revoluciones entonces la lectura a 600 revoluciones es igual a la lectura a 300 revoluciones más la viscosidad plástica.

$$\theta_{300} = PV + YP$$

$$\theta_{300} = 26 \frac{lb}{100ft^2} + 14 \frac{lb}{100ft^2}$$

$$\theta_{300} = 40 \frac{lb}{100ft^2}$$

$$\theta_{600} = \theta_{300} + PV$$

$$\theta_{600} = 40 \frac{lb}{100ft^2} + 26 \frac{lb}{100ft^2}$$

$$\theta_{600} = 66 \frac{lb}{100ft^2}$$

$$n_p = 3.32 \log \left( \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}} \right)$$



$$n_p = 3.32 \log\left(\frac{66}{40}\right)$$

$$n_p = 0.72$$

Ahora se busca determinar el valor de K del fluido en tubería:

$$K_p = \frac{5.11(\theta 600)}{1022^{n_p}}$$

$$K_p = \frac{5.11(66)}{1022^{0.72}}$$

$$K_p = 2.29cP$$

Se calcula la viscosidad eficiente en tubería:

$$\mu_{ep} = 100(K_p) \left[ \frac{96(V_p)}{D_{IDp}} \right]^{n_p-1}$$

$$\mu_{ep} = 100(2.29cP) \left[ \frac{96(8.92 \text{ ft/s})}{4.276 \text{ in}} \right]^{0.72-1}$$



$$\mu_{ep} = 51.92cP$$

Estos valores calculados no cambiaran a menos de que el fluido cambie, entonces se procede a buscar el tipo de flujo al que está sometido el fluido, recordando que entre más debajo de la sarta nos encontremos esperaremos flujos turbulentos y a una profundidad somera el retorno se espera que sea de tipo laminar. Entonces se calcula el número de Reynolds aplicado a hidráulica de fluidos y un margen para determinar si es flujo turbulento o laminar.

$$Re_p = \frac{928(v_p)(D_{IDp})(MW)}{(\mu_{ep}) \left[ \frac{3n_p + 1}{4n_p} \right]^{n_p}}$$

$$Re_p = \frac{928(8.92 \text{ ft/s})(4.276 \text{ in})(12 \text{ ppg})}{(51.92cP) \left[ \frac{3(0.72) + 1}{4(0.72)} \right]^{0.72}}$$

$$Re_p = 7652.17$$

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

$$Re_L = 3470 - 1370(0.72)$$





$$Re_L = 2483.6$$

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

$$Re_T = 4270 - 1370(0.72)$$

$$Re_T = 3283.6$$

Entonces se obtiene que  $Re_p > Re_T$  entonces como se esperaba se tiene un flujo de tipo turbulento, con esto se calcula un factor de fricción.

$$f_p = \frac{((\log(n_p) + 3.93)/50)}{\frac{([1.75 - \log(n_p)])}{7} Re_p}$$

$$f_p = \frac{((\log(0.72) + 3.93)/50)}{7652.17 \frac{([1.75 - \log(0.72)])}{7}}$$

$$f_p = 6.74 \times 10^{-3}$$

Como último paso se calcula la pérdida de presión en el intervalo de interés, en este caso será la tubería de perforación y posteriormente se determinarán los demás.



$$\Delta P_{pl} = \frac{(f_p)(V_p^2)(MW)}{25.8(D_{IDp})} (L)$$

$$\Delta P_{pl} = \frac{(6.74 \times 10^{-3})(8.92 \text{ ft/s})^2 (12 \text{ ppg})}{25.8(4.276 \text{ in})} (15000 - 650)$$

$$\Delta P_s = 837.07 \text{ psi}$$

### 4.3.2 Lastrabarrena

Se hará a continuación el mismo procedimiento eximiendo las fórmulas y los datos que se quedaran iguales, como son:  $n_p$ ,  $k_p$ ,  $R_{eT}$  y  $R_{eL}$ .

$$V_p = \frac{(0.408)(400 \text{ gpm})}{3.0^2}$$

$$V_p = 18.13 \text{ ft/s}$$

$$\mu_{ep} = 100(2.29 \text{ cP}) \left[ \frac{96 (18.13 \text{ ft/s})}{3.0 \text{ in}} \right]^{0.72-1}$$



$$\mu_{ep} = 38.55cP$$

$$Re_p = \frac{928(18.13 \text{ ft/s})(3.0in)(12ppg)}{(38.55cP) \left[ \frac{3(0.72) + 1}{4(0.72)} \right]^{0.72}}$$

$$Re_p = 14696.42$$

Como el flujo sigue en descendencia y bombeado tal y como se esperaba  $Re_p > Re_T$  entonces se tiene un flujo de tipo turbulento, con esto se calcula un factor de fricción.

$$f_p = \frac{((\log(0.72) + 3.93)/50)}{14696.42 \frac{((1.75 - \log(0.72))}{7}}$$

$$f_p = 5.65 \times 10^{-3}$$

$$\Delta P_{pl} = \frac{(5.65 \times 10^{-3}) (18.13 \text{ ft/s})^2 (12ppg)}{25.8(3.0in)} (650)$$

$$\Delta P_s = 187.15 \text{ psi}$$



Se hace una sumatoria de todas las caídas de presión en la sarta, en este caso práctico sólo existen dos, la tubería de perforación y los lastrabarrenas. Si existieran más se realiza el cálculo de todos y posteriormente la sumatoria total de pérdida de presión.

$$\Delta P_{pIT} = 837.07 \text{ psi} + 187.15 \text{ psi}$$

$$\Delta P_{sT} = 1024.22 \text{ psi}$$

Como existen pérdidas de presión en las conexiones superficiales, barrena y sarta también las tenemos en el espacio anular, ahora se procederá hacer a demostración tomando en cuenta que su cálculo es muy similar al cálculo en sarta, pero variando diámetros dependiendo la sección en la que se encuentre la zona de interés a evaluar.

## 4.4 Espacio anular

### 4.4.1 Tubería de perforación y tubería de revestimiento

Al igual que en el análisis de sarta, en el espacio anular se calcula la velocidad de flujo en el mismo.

$$V_a = \frac{(0.408)(Q)}{\left((D_h^2) - (D_p^2)\right)}$$

$$V_a = \frac{(0.408)(400 \text{ gpm})}{((9.95 \text{ in})^2 - (5 \text{ in})^2)}$$



$$V_a = 2.20 \text{ ft/s}$$

Se procede a calcular los valores adimensionales de  $n$  y  $k$  para obtener la viscosidad eficiente del espacio anular, estos valores de factores adimensionales no cambiarán a menos de que el fluido sea diferente.

$$n_a = 0.5 \log\left(\frac{\theta 300}{\theta 3}\right)$$

$$n_a = 0.5 \log\left(\frac{40}{8}\right)$$

$$n_a = 0.35$$

$$K_a = \frac{5.11(\theta 300)}{511^{n_a}}$$

$$K_a = \frac{5.11(40)}{511^{0.35}}$$

$$K_a = 23.04$$



$$\mu_{ea} = 100(K_a) \left[ \frac{144(V_a)}{D_h - D_p} \right]^{n_a - 1}$$

$$\mu_{ea} = 100(23.04) \left[ \frac{144(2.20 \text{ ft/s})}{9.95 \text{ in} - 5 \text{ in}} \right]^{0.35 - 1}$$

$$\mu_{ea} = 154.33 \text{ cP}$$

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 estamos frente a 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 superficie en el recorrido de regreso del fluido.

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

$$Re_a = \frac{928(2.20 \text{ ft/s})(9.95 \text{ in} - 5 \text{ in})(12 \text{ ppg})}{(154.33 \text{ cP}) \left[ \frac{2(0.35) + 1}{3(0.35)} \right]^{0.35}}$$

$$Re_a = 663.84$$

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



$$Re_L = 3470 - 1370(0.35)$$

$$Re_L = 2990.5$$

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

$$Re_T = 4270 - 1370(0.35)$$

$$Re_T = 3790.5$$

Como el flujo va de regreso y ahora en contra de la gravedad y ha perdido el bombeo eficaz el resultado es  $Re_a < Re_T$  entonces se tiene un flujo de tipo laminar, como era de esperarse entonces se calcula el factor de fricción para obtener la pérdida de presión en esa sección.

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

$$f_a = \frac{24}{663.84}$$

$$f_a = 0.036$$



$$\Delta P_{pl} = \frac{(f_a)(V_a^2)(MW)}{25.8(D_h - D_p)} (L)$$

$$\Delta P_{pl} = \frac{(0.036)(2.20 \text{ ft/s})^2(12 \text{ ppg})}{25.8(9.95 - 5)} (12000)$$

$$\Delta P_{ea} = 196.46 \text{ psi}$$

Ahora se procederá hacer el cálculo de la pérdida de presión en la intersección entre la tubería de perforación y el agujero descubierto.

$$V_a = \frac{(0.408)(400 \text{ gpm})}{\left(\left(9\frac{7}{8} \text{ in}\right)^2 - (5 \text{ in})^2\right)}$$

$$V_a = 2.25 \text{ ft/s}$$

Recordando que  $n$ ,  $k$ ,  $R_{eT}$  y  $R_{eL}$  se mantienen iguales a menos de que el fluido cambie, se procede entonces al cálculo de hidráulico empezando por la viscosidad eficiente y el número de Reynolds para determinar el factor de fricción entre el agujero descubierto y la tubería de perforación.





$$\mu_{ea} = 100(23.04) \left[ \frac{144(2.25 \text{ ft/s})}{9\frac{7}{8} \text{ in} - 5 \text{ in}} \right]^{0.35-1}$$

$$\mu_{ea} = 150.59 \text{ cP}$$

$$Re_a = \frac{928(2.25 \text{ ft/s}) \left(9\frac{7}{8} \text{ in} - 5 \text{ in}\right) (12 \text{ ppg})}{(150.59 \text{ cP}) \left[ \frac{2(0.35) + 1}{3(0.35)} \right]^{0.35}}$$

$$Re_a = 685.25 \text{ cP}$$

$$f_a = \frac{24}{685.25}$$

$$f_a = 0.035$$

$$\Delta P_{pl} = \frac{(0.035)(2.25 \text{ ft/s})^2 (12 \text{ ppg})}{25.8 \left(9\frac{7}{8} - 5\right)} (3000 - 650)$$

$$\Delta P_{ea} = 39.72 \text{ psi}$$



Por último, se realiza la determinación de la caída de presión entre el lastrabarrena y el agujero descubierto.

$$V_a = \frac{(0.408)(400 \text{ gpm})}{\left( \left( 9 \frac{7}{8} \text{ in} \right)^2 - (8 \text{ in})^2 \right)}$$

$$V_a = 4.86 \text{ ft/s}$$

$$\mu_{ea} = 100(23.04) \left[ \frac{144(4.86 \text{ ft/s})}{9 \frac{7}{8} \text{ in} - 8 \text{ in}} \right]^{0.35-1}$$

$$\mu_{ea} = 49.05 \text{ cP}$$

$$Re_a = \frac{928(4.86 \text{ ft/s}) \left( 9 \frac{7}{8} \text{ in} - 8 \text{ in} \right) (12 \text{ ppg})}{(49.05 \text{ cP}) \left[ \frac{2(0.35) + 1}{3(0.35)} \right]^{0.35}}$$

$$Re_a = 1747.78 \text{ cP}$$

El flujo sigue siendo de tipo laminar debido a que sigue siendo menos del límite del número de Reynolds.

$$f_a = \frac{24}{1747.78}$$



$$f_a = 0.013$$

$$\Delta P_{pl} = \frac{(0.013)(4.86 \text{ ft/s})^2(12 \text{ ppg})}{25.8 \left(9 \frac{7}{8} \text{ in} - 8 \text{ in}\right)} (650)$$

$$\Delta P_{ea} = 49.51 \text{ psi}$$

Para terminar con el caso práctico de hidráulica se obtiene la caída de presión total en espacio anular y con esto se completan todas las pérdidas de presión y por último se hace una sumatoria total de las mismas.

$$\Delta P_{eaT} = 196.46 \text{ psi} + 39.72 \text{ psi} + 49.51 \text{ psi}$$

$$\Delta P_{eaT} = 285.69 \text{ psi}$$

Con una última sumatoria de todas las pérdidas de presión se obtiene que por hidráulica tendremos una pérdida de presión total de:

$$\Delta P_T = \Delta P_{SCS} + \Delta P_{bit} + \Delta P_s + \Delta P_{ea}$$

$$\Delta P_T = 23.72 \text{ psi} + 1610.08 \text{ psi} + 1024.22 \text{ psi} + 285.69 \text{ psi}$$



$$\Sigma P_T = 2943.71 \text{ psi}$$

El último paso sería determinar la densidad equivalente de circulación que deberá tener el lodo de perforación para poder vencer esas pérdidas de presión y continuar realizando su función

$$ECD = \frac{P_{eaT}}{(0.052)(TVD)} + MW$$

$$ECD = \frac{285.69 \text{ psi}}{(0.052)(11500 \text{ ft})} + 12 \text{ ppg}$$

$$ECD = 12.47 \text{ ppg}$$

Entonces la densidad equivalente de circulación que debe tener el lodo de perforación es de 12.47 ppg que es aproximadamente 1.49 g/cc para poder vencer las pérdidas de presión en comparación de la densidad inicial de 1.44 g/cc, representando una gran diferencia considerable en términos de densidad en fluido de perforación.

#### 4.5 Hidráulica de barrena

Para conocer la hidráulica de la barrena primero que nada obtendremos la velocidad anular de la misma en ft/min:



$$AV = \frac{24.5 \times Q}{D_h^2 - D_p^2}$$

$$AV = \frac{24.5 \times 400}{9.875^2 - 5^2}$$

$$AV = 135.14 \text{ ft/min}$$

Calculando los caballos de fuerza hidráulica en la barrena:

$$HHPb = \frac{Q * P_b}{1714}$$

$$HHPb = \frac{400 * 1610}{1714}$$

$$HHPb = 375.72 \text{ HP}$$

Obteniendo el HHPb por pulgada cuadrada en el área de la barrena tenemos:

$$\frac{HHPb}{sq. in.} = \frac{HHPb * 1.27}{bit \text{ size}^2}$$



$$\frac{HHPb}{sq. in.} = \frac{375.72 * 1.27}{9.875}$$

$$\frac{HHPb}{sq. in.} = 4.89 \text{ HP}/in^2$$

Ahora determinando el % de la perdida de presión en la barrena:

$$\%psib = \frac{Pb}{surface, psi} * 100$$

$$\%psib = \frac{1610}{2950} * 100$$

$$\%psib = 54.57\%$$

Continuando, obtenemos el caballaje hidráulico total del sistema circulante:

$$SysHHP = \frac{surface, psi * Q}{1714}$$

$$SysHHP = \frac{2950 * 400}{1714}$$

$$SysHHP = 679.11 \text{ HP}$$



Calculando la velocidad de chorro en la barrena:

$$Vn = \frac{417.2 * Q}{(N1)^2 + (N2)^2 + (N3)^2}$$

$$Vn = \frac{417.2 * 400}{(12)^2 + (12)^2 + (12)^2}$$

$$Vn = 386.29 \text{ ft/s}$$

Calculando la fuerza de impacto en la barrena en lb tenemos que:

$$IF = \frac{(MW)(Vn)(Q)}{1930}$$

$$IF = \frac{(12)(386.29)(400)}{1930}$$

$$IF = 960.72 \text{ lb}$$



Finalmente calculamos la fuerza de impacto por pulgada cuadrada del área de la barrena de la siguiente forma:

$$\frac{IF}{sq.in.} = \frac{IF * 1.27}{bit\ size^2}$$

$$\frac{IF}{sq.in.} = \frac{960.72 * 1.27}{9.875^2}$$

$$\frac{IF}{sq.in.} = 12.51\ lb/in^2$$

#### 4.6 Limpieza de pozo

Existen diferentes enfoques para la limpieza eficaz del pozo, pero para este caso se utilizará un específico conocido principalmente como “enfoque 2” para el calcula de Vs

Se comenzará determinando la velocidad anular entre el agujero descubierto y la tubería de perforación;

$$VA = \frac{24.5 \times Q}{D_h^2 - D_p^2}$$

$$VA = \frac{24.5 \times 400\ gpm}{9.875^2 - 5^2}$$





$$VA = 135.14 \text{ ft}/\text{min}$$

Se procede ahora a determinar la velocidad de desplazamiento de recortes

$$V_s = 0.45 \left( \frac{PV}{(MW)(Dc)} \right) \left[ \sqrt{\frac{36,800}{\left( \frac{PV}{(MW)(Dc)} \right)^2} \times (Dc) \left( \frac{DenP}{MW} - 1 \right) + 1} - 1 \right]$$

$$V_s = 0.45 \left( \frac{26 \text{ lb}/100 \text{ ft}^2}{(12 \text{ ppg})(0.25 \text{ in})} \right) \left[ \sqrt{\frac{36,800}{\left( \frac{26 \text{ lb}/100 \text{ ft}^2}{(12 \text{ ppg})(0.25 \text{ in})} \right)^2} \times (0.25) \left( \frac{22 \text{ ppg}}{12 \text{ ppg}} - 1 \right) + 1} - 1 \right]$$

$$V_s = 35.69 \text{ ft}/\text{min}$$

Con esto se procederá a revisar el porcentaje de concentración de recortes de volumen, a través de determinar el transporte de partículas en ascenso, el tiempo de transporte del intervalo y tiempo anular de transporte respectivamente mostrado a continuación.

$$NPT(\text{ft}/\text{min}) = V_A - V_S$$



$$NPT(ft/min) = 135.14 \text{ ft}/\text{min} - 35.69 \text{ ft}/\text{min}$$

$$NPT(ft/min) = 99.45 \text{ ft}/\text{min}$$

$$ITT(\text{min}) = \text{long. intervalo} \div (NPT)$$

$$ITT(\text{min}) = 12,000 \text{ ft} \div (99.45 \text{ ft}/\text{min})$$

$$ITT(\text{min}) = 120.66$$

Al no existir otros intervalos en el análisis el ITT es igual al ATT. Entonces se determina la eficiencia de transporte neta de recortes en el espacio anular en porcentaje

$$NTE = \frac{V_A - V_s}{V_A} (100)$$

$$NTE = \frac{135.14 \text{ ft}/\text{min} - 35.69 \text{ ft}/\text{min}}{135.14 \text{ ft}/\text{min}} (100)$$

$$NTE = 73.59\%$$



Ahora se procede a conocer la concentración de recortes basando en el ritmo de penetración

$$C_a = \frac{(D_{bit}^2)(ROP)}{448.4(Q) \left(\frac{NTE}{100}\right)} \quad (100)$$

$$C_a = \frac{(9.875in)^2 (50^{ft/hr})}{448.4(400gpm) \left(\frac{73.59}{100}\right)} \quad (100)$$

$$C_a = 3.69\%$$

Al tener una acumulación de recortes el fluido aumenta su peso, entonces se procederá a determinar ese peso efectivo del fluido con las acumulaciones en el espacio anular con apoyo de la gravedad.

$$\rho_a = (SGc)(8.34) \left(\frac{Ca}{100}\right) + MW \left(1 - \frac{Ca}{100}\right)$$

$$\rho_a = (3.82)(8.34) \left(\frac{3.69}{100}\right) + 12ppg \left(1 - \frac{3.69}{100}\right)$$

$$\rho_a = 12.73ppg$$



Se espera una buena limpieza del pozo cuando el CCI es igual o mayor que 1, los recortes son afilados y grandes. Cuando el CCI tiene un valor de 0.5, los recortes son redondeados y generalmente muy pequeños. Cuando el CCI tiene un valor menor a 0.3, los recortes pueden ser de tamaño de grano.

Resumiendo, si el CCI es igual o menor a 0.5, la limpieza del pozo es pobre, si el CCI es igual o mayor a 1, la limpieza del pozo es buena.

#### 4.6.1 Índice de capacidad de carga CCI

Calculado con el modelo de Herschel-Bulkley

$$n_{HB} = 3.32 \log_{10} \frac{(2(PV) + (YP))}{(PV + YP)}$$

$$n_{HB} = 3.32 \log_{10} \frac{(2(26\text{lb}/100 \text{ft}^2) + (14\text{lb}/100 \text{ft}^2))}{(26 \text{lb}/100 \text{ft}^2 + 14\text{lb}/100 \text{ft}^2)}$$

$$n_{HB} = 0.72$$

$$K_{HB} = (511^{1-n_{HB}})(PV + YP)$$

$$K_{HB} = (511^{1-0.72})(26 \text{ lb}/100 \text{ ft}^2 + 14\text{lb}/100 \text{ ft}^2)$$

$$K_{HB} = 229.30\text{lb}/100 \text{ft}^2$$



Se puede observar que esta  $n$  y  $k$  es idéntica al valor obtenido con anterioridad en la hidráulica de pozos, siendo otra forma de obtenerse.

Como paso final se calcula la CCI para saber si nuestro lodo genera o no una buena limpieza.

$$CCI = \frac{(MW)(K_{HB})(V_a)}{400,000}$$

$$CCI = \frac{(12ppg)(229.30\text{lb}/100\text{ft}^2)(135.14\text{ft}/\text{min})}{400,000}$$

$$CCI = 0.93$$

Se puede decir que la limpieza en este caso no es mala y tampoco es buena debido a que no entra en alguno de los parámetros mencionados anteriormente, pero tiende a estar más apegada a una tendencia de limpieza *buen*a entonces fluido de perforación cumple con las necesidades del pozo.



## CONCLUSIÓN

Con base en la creación de la presente guía práctica se tomaron en cuenta principalmente dos temas los cuales son; hidráulica del pozo y limpieza del mismo, la importancia que toman debido a los problemas a lo que se somete el sistema circulatorio cuando el lodo de perforación siendo el primer sistema de control en el pozo no cumple con las características necesarias para compensar las caídas de presión las cuales vemos involucradas a través de una densidad equivalente de circulación que se debe modificar a partir de la densidad del fluido de control siendo esta la que se obtiene a partir del diseño de la venta operativa, se observa entonces que este método no es suficiente pero si da la pauta al inicio de un análisis más detallado como el que vemos implementado en esta guía para compensar dicha densidad.

Por otra parte la limpieza del pozo a través de las propiedades reológicas y tixotrópicas del fluido de control es de suma importancia para evitar los problemas frecuentes que se presentan cuando el lodo no cumplen con las propiedades adecuadas, como lo son principalmente el atascamiento de la tubería, falla en la cementación y una menor tasa de penetración las cuales se consideran entre otras como las más graves afectando a la construcción del pozo, el cuerpo de esta guía representa una forma general de cómo prevenir dichos problemas implementando un análisis previo y en de manera actual si ya está corriendo el lodo de ver si cumplirá o no con la limpieza de forma eficaz y así optimizar los tiempo de perforación.

Queda claro entonces que es preferible una revisión previa tanto de la hidráulica como de la limpieza del pozo con un análisis en las propiedades densificantes, tixotrópicas y reológicas para cumplir con las funciones que se requieren.



## BIBLIOGRAFÍA

- ✚ Adams, N. (2012). DRILLING ENGINEERING A COMPLETE WELL PLANNING APROACH. Tulsa: Penwell Books.
- ✚ B AND H. (2014). DRILLING LUID REFERENCE MANUAL. Houston: Penwell books.
- ✚ Barnes, H. (2015). INTRODUCTION TO RHEOLOGY. Amsterdam: Elsevier.
- ✚ Barron, Gonzalez, J. M. (2014). CAUSAS, EFECTOS Y METODOS DE CONTROL DEL FLUJO PULSANTE EN BOMBAS, COMPRESORES Y MEDIDORES DE FLUJO. México: UNAM.
- ✚ Clayton, T., C., Donald, E., E., & John, A. , R. (2010). MECÁNICA DE FLUIDOS. Barcelona: Patria.
- ✚ De la Torre Ramos, E. (2017). MANUAL DE PERFORACIÓN DE POZOS PETROLIFEROS. México: Trillas.
- ✚ De la Torre, Ramos, E., Ramos Rodriguez, H., & Jimenes y Galvan, J. (2017). TERMIANCIÓN Y REPARACIÓN DE POZOS PETROLIFEROS. México: Trillas.
- ✚ Energy API. (2012). MANUAL DE FLUIDOS DE CONTROL. DALLAS: WILEY.
- ✚ Escobar, Macualo, F. H. (2015). FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA DE YACIMIENTOS. Neiva: Universidad Surcolombiana.
- ✚ keith, K. (205). APPLIED DRILLING ENGINEERING. Texas: SPE Textbook.
- ✚ King, R. (2011). INTRODUCTION TO PRACTICAL FLUID FLOW. Boston: Oxford.
- ✚ Martinez, A. C. (2007). MECÁNICA DE FLUIDOS. Madrid: Paraninfo.
- ✚ PEMEX. (2013). MANUAL PARA PERFORADOR Y AYUDANTE. México: Unidad de Perforación y Mantenimiento de Pozos.
- ✚ Pennwell Publishing Company. (1996). GLOSSARY OF THE PETROLEUM INDUSTRY. Dallas: Wiley.



- ✚ Reyes, S. A. (2014). PROGRAMA EN VISUAL BASIC PARA EL CÁLCULO DE HIDRÁULICA BÁSICA, PÉRDIDA DE FRICCIÓN, OPTIMIZACIÓN DE LA HIDRÁULICA Y LA RELACIÓN DE TRANSPORTE DE LOS RECORTES. México: UNAM.
- ✚ Schlumberger. (15 de enero de 2017). Oilfield Glossary. Recuperado el 20 de octubre de 2019, de Oilfield Glossary: [https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/s/shear\\_rate.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/s/shear_rate.aspx)
- ✚ Speers, R. (2014). COMPUTER-AIDED RHEOLOGICAL ANALYSIS OF DRILLING FLUIDS. TEXAS: LATINDEIX.
- ✚ De la Torre Ramos, E. (2017). MANUAL DE PERFORACIÓN DE POZOS PETROLIFEROS. México: Trillas.
- ✚ De la Torre, Ramos, E., Ramos Rodriguez, H., & Jimenes y Galvan , J. (2017). TERMINACIÓN Y REPARACIÓN DE POZOS PETROLIFEROS. México: Trillas.
- ✚ schlumberger. (20 de junio de 2015). Oilfield Review. Recuperado el 22 de octubre de 2019, de Oilfield Review: <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/define-cement-3-spanish>
- ✚ Transocean. (2012). WELL DESIGN AND PRODUCCION CASING CEMENT. Tulsa: Arcadia.