



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

COMPENDIO DE REOLOGÍA, HIDRÁULICA Y CONTROL DE SÓLIDOS EN LA PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS, Y CÁLCULO DE LIMPIEZA DE POZOS DESVIADOS: CASO PRÁCTICO PARA UN POZO CON ÁNGULO DE DESVIACIÓN DE 60°.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO PETROLERO

PRESENTA:

L U I S O T H O N I E L A L E G R Í A G A R C Í A

DIRECTOR DE TESIS:

ING. MARÍA CRISTINA AVILÉS ALCÁNTARA



México, D.F.

Febrero 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haberme permitido concluir una etapa más de mi vida, por estar a mi lado tanto en momentos difíciles como en aquéllos de grandes satisfacciones. Con mi eterno agradecimiento por tantas bendiciones recibidas.

A mis padres, el Sr. José Luis Alegría Osorio y la Sra. Lucy García Payró, por haberme dado el don de vivir y por haberme mostrado que no hay límites en la vida, solo los que uno mismo se pone; por haberme enseñado tantos valores universales, que me han permitido alcanzar nuevos horizontes y sobre todo, por su infinito amor y dedicación a todos nosotros, sus hijos. Esto es también de ustedes. Gracias.

A mis hermanos, Jesús David y Christian Gabriela, por todo el apoyo que me brindaron, por todos sus buenos deseos, por compartir desde niños tristezas y alegrías, por enseñarme a vencer nuevos retos para mejorar día a día. Sé que ustedes también alcanzarán todo lo que se propongan, sigan luchando. Son unos campeones, estoy muy orgulloso de ustedes.

A mis segundos padres, Luis A. Martín-Sánchez Aranda y Camila Madero de Martín-Sánchez, quiero agradecerles profundamente todo el afecto y cariño que han depositado en mí, al haberme abierto las puertas de su hogar y enseñarme magníficas cosas que han perfeccionado mi vida. Que Dios los bendiga siempre, a donde quiera que vayan.

A mis profesores, compañeros y amigos, los de la primaria Adolfo López Mateos, los del CBTis No. 32 y sobre todo a los de la Facultad de Ingeniería, por ser unas excelentes personas, por brindarme su apoyo y amistad y compartir conmigo grandes experiencias dentro y fuera de las aulas; por permitirme aprender de ustedes, ya que, cada uno contribuye de manera especial a convertirme en un ser humano cada vez más completo.

A mi demás familia, que reside en Tabasco, mis tíos, tías, primos, primas y de manera especial a mi abuelita por todas sus preocupaciones, atenciones, cariños y afectos que me han demostrado desde que tomé la decisión de venir a estudiar a la Ciudad de México. Sus consejos han sido valiosos para mí.

RECONOCIMIENTOS

A mi director de tesis, la Ing. Ma. Cristina Avilés Alcántara, por sus generosos comentarios y sugerencias para enriquecer la tesis.

A mis sinodales, Ing. Manuel Villamar Vigueras, Ing. Martín Carlos Velázquez Franco, M. C. Jaime Ortiz Ramírez y Dr. Porfirio Mendizábal Cruz, por todas sus amables atenciones y apoyos recibidos para la revisión de la tesis.

Al Ing. Juan Climaco, por su atención y su importante contribución bibliográfica a la tesis.

A mi Universidad, la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, así como a mi Facultad, la FACULTAD DE INGENIERÍA, por proporcionarme todas las herramientas e instalaciones necesarias para formarme tanto en el campo del conocimiento y del saber, como en el ámbito personal.

Vine a este mundo a ser feliz, y la felicidad para mí, es todo aquel acto que me lleva a la satisfacción propia, procurando en ese camino, no perjudicar a nadie.

Luís Othoniel

CONTENIDO.

	Pág.
Prefacio.	i
1. Generalidades.	1
1.1. Planteamiento del Problema.	1
1.2. Tiempos No Productivos en la Perforación.	1
2. Hidráulica de la Perforación.	4
2.1. Reología de los Fluidos.	4
2.1.1. Introducción.	4
2.1.2. Modelos Reológicos.	7
2.1.3. Análisis Matemático del Modelo Reológico Ley de Potencias.	8
2.2. Pérdidas de Presión por Fricción.	11
2.2.1. Introducción.	11
2.2.2. Ecuación de Balance de energía.	12
2.2.3. Régimen de Flujo.	14
2.2.4. Determinación en el Campo de las Pérdidas de Presión por Fricción.	16
2.2.5. Densidad Equivalente de Circulación.	19
2.3. Optimización de la hidráulica.	20
2.3.1. Introducción.	20
2.3.2. Hidráulica Óptima.	21
2.3.3. Criterios de Optimización.	23
2.4. Capacidad de Acarreo de los Recortes.	24
2.4.1. Introducción.	24
2.4.2. Velocidad Terminal de Asentamiento.	25

3. Control de Sólidos.	27
3.1. Transporte de los Sólidos Perforados.	27
3.2. Sistema de Control de Sólidos.	27
3.2.1. Línea de Flote.	27
3.2.2. Temblorinas.	29
3.2.3. Trampa de Arena.	34
3.2.4. Desgasificadores.	35
3.2.5. Hidrociclones.	36
3.2.6. Limpiador de Lodos.	40
3.2.7. Centrífugas Decantadoras.	41
3.2.8. Tanques de lodo.	47
4. Limpieza del Pozo.	50
4.1. Introducción.	50
4.2. Factores generales que afectan la limpieza del pozo.	50
4.3. Pozos verticales y casi verticales.	54
4.4. Pozos desviados.	55
4.5. Agujero descalibrado.	60
4.6. Gráficas para la limpieza de pozos desviados.	60
5. Cálculos de la hidráulica de la Perforación y de la Limpieza del Pozo.	64
5.1. Cálculo de la hidráulica para un pozo vertical.	64
5.2. Cálculo de la limpieza para un pozo con ángulo de desviación de 60°.	74
5.3. Análisis de resultados.	77
6. Conclusiones y Recomendaciones.	79
Nomenclatura.	81
Referencias.	83

PREFACIO

Para poder llevar a cabo el proceso de la perforación de pozos petroleros, es necesaria la aplicación de dos tipos de energía: Energía Mecánica y Energía Hidráulica.

La energía mecánica se emplea sobre el fondo del pozo, es decir, la aplicación de la carga sobre la barrena y que a su vez se transmite a la formación que se perfora, y la velocidad de rotación impuesta en la barrena mediante la sarta de perforación y la mesa rotaria. Con estos elementos la barrena realiza la función de rascar, triturar o fracturar las formaciones.

La energía hidráulica tiene como principal función la limpieza del fondo del pozo y del agujero a través del sistema circulatorio por la circulación del fluido de control, así como del transporte de los recortes hacia la superficie.

Con la aplicación de estas dos energías se cumple el fundamento básico de la perforación: penetrar la roca y remover los recortes generados.

La hidráulica de la perforación se refiere comúnmente a la determinación de la relación entre el gasto volumétrico de flujo (gasto circulatorio) y la presión de bombeo, así como a la selección de las toberas de la barrena que satisfaga alguna función objetivo (criterio de optimización). A esto se le denomina Optimización de la Hidráulica.

Sin embargo, en la hidráulica de la perforación también se incluyen otros aspectos tales como el comportamiento de flujo de los fluidos (reología), las pérdidas de presión por fricción, la utilización eficiente de la energía (optimización de la perforación), así como, el transporte de recortes desde el fondo del pozo hacia la superficie (capacidad de acarreo de recortes).

Este último es importante en la limpieza del pozo, debido a que en pozos inclinados menores a 30° , los recortes son suspendidos eficazmente por el fluido y no forman camas. Mas allá de los 30° , los recortes forman camas en la parte inferior del pozo, los cuales se pueden deslizar hacia el fondo del pozo, causando que el espacio anular se empaque.

Otro aspecto importante en el sistema hidráulico es el control de los sólidos, ya que al conseguir la separación progresiva de los sólidos perforados, considerando su tamaño de partícula, evita que el fluido de perforación que retorna al sistema circulatorio se contamine y cause graves problemas de operación; por tal razón, en este trabajo, se considera el equipo de control de sólidos.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. Planteamiento del problema.

En la práctica, existe una gran cantidad de variables que afectan la continuidad de la perforación de pozos en la industria petrolera; habiendo así, tiempos no productivos en la perforación de pozos petroleros, que influyen de manera importante en la producción de una compañía petrolera. Y uno de estos tantos problemas que se presentan actualmente y que afectan al proceso de la perforación es la deficiente limpieza de pozos petroleros.

Por tal motivo, este trabajo se enfoca y realiza el cálculo de la hidráulica de la perforación y el cálculo de la limpieza de pozos desviados.

Este último es importante, ya que en pozos inclinados menores a 30° , los recortes son suspendidos eficazmente por el fluido y no forman camas. Mas allá de los 30° , los recortes forman camas en la parte inferior del pozo, los cuales se pueden deslizar hacia el fondo del pozo, causando que el espacio anular se empaque y por consiguiente haya discontinuidad en la perforación.

Debido a esto, en este trabajo se aplica el método gráfico propuesto en la práctica recomendada del API RP 13D 4a. edición para un pozo con ángulo de 60° , versión en la que se incluye la limpieza de pozos verticales y de pozos desviados (ángulos $> 30^\circ$).

1.2. Tiempos no productivos en la perforación.¹

Los tiempos no productivos en la perforación de pozos petroleros pueden ser debido a:

i). Fallas en el sistema hidráulico.

Para la aplicación del cálculo de hidráulica propuesto en este trabajo, es necesario que se cuantifiquen los tiempos no productivos relacionados con el sistema circulatorio, en los que se incluye el sistema de fluido, capacidad de las bombas del equipo y equipos de control de sólidos y posteriormente detectar el origen de los problemas y aplicar la metodología de cálculo.

Además es importante llevar una estadística detallada de los paros de bomba, ya que con esto, podremos determinar con exactitud cuantas fallas son por efecto de causas externas de la bomba (condiciones o limpieza del fluido) y cuantas son causadas por las bombas.

Y ya determinada la causa con exactitud, podremos corregirlas más eficientemente.

Las clasificaciones posibles de los mantenimientos, para obtener una estadística objetiva y confiable son:

1. Mantenimiento operativo.
 - Cambio de hidráulica por vida útil.
 - Cambio de hidráulica por cambio de diámetro.
2. Mantenimiento correctivo
 - Por falla prematura de elementos de desgaste
 - Calidad de la refacción.
 - Mala selección del material a utilizar.
 - Por falla prematura de elementos de desgaste originado por la calidad o las características químicas y físicas del fluido.
 - Características de diseño.
 - Características fuera de diseño.
 - Por falla de elementos no considerados de desgaste.
 - Por fallas ocasionadas por mala o inadecuada aplicación de procedimientos del mantenimiento.

Otras fallas en el sistema hidráulico pueden ser:

- **La falta de capacidad hidráulica de la bomba.**

Es necesario determinar las capacidades de los equipos en función de los requerimientos de los pozos a perforar, para que nos permita tener la optimización de la hidráulica, una potencia optimizada que sea transmitida por la bomba hasta el fondo del pozo y tamaño adecuado de toberas, que ayuden a una correcta limpieza del pozo, así como mayor eficiencia de los motores.

Además deben de tener la capacidad en gasto y presión, para mantener controlado el pozo.

- **Diseño de los circuitos hidráulicos, diámetros interiores, codos, tes y ensamble para descarga de las bombas.**

Verificar los diseños y la instalación de los circuitos hidráulicos, así como, calcular las caídas de presión por codos, tes y diámetros interiores.

Verificar del circuito hidráulico los diámetros interiores de todos los componentes (válvulas, mangueras, unión giratoria, tubería) y el ensamble de descarga de las bombas.

ii). Fallas en el sistema de control de sólidos.

Estas posibles causas de fallas son las siguientes:

- **Selección inadecuada del equipo de limpieza del fluido.**

Se deberá verificar que el equipo de limpieza, el equipo de preparación y la conservación del fluido de control, sea el mas adecuado, para ello se deberá verificar:

- Mallas de temblorina
- Agitadores e impelentes
- Capacidad de temblorina
- Bombas centrifugas
- Bastidores
- Diseño de interiores de las presas
- Selección e intercomunicación de presas

- **Sistema de fluidos.**

Se debe conocer y mantener controlados la propiedades fisicoquímicas, tales como, la densidad, viscosidad, ph y temperatura.

Se deberá monitorear el fluido de control y la calidad de su limpieza con la frecuencia necesaria con el objeto de seleccionar el material mas adecuado, para garantizar una adecuada operación de la bomba y asegurar que se cumpla con las especificaciones requeridas.

También se debe considerar, para obtener la mayor vida útil posible a los componentes del cuerpo hidráulico:

- Que los fluidos utilizados tengan un punto de anilina de 150 ° F o más para que las partes de hule den un buen servicio.
- Evitar en lo posible, temperaturas mayores a los 100 ° F en la succión ya que la temperatura daña los elastómeros, las temperaturas mayores de 150 ° F producen burbujeo dentro de la camisa.
- Verificar constantemente que el fluido se encuentre lo mas limpio posible, para ello deberá asegurarse de que todo el sistema de filtración del equipo auxiliar para lodos, opere correctamente, así como los cedazos adicionales que se instalen con este objeto.

CAPÍTULO 2

HIDRÁULICA DE LA PERFORACIÓN.

2.1. Reología de los fluidos.^{2,3,10,12,13}

2.1.1. Introducción.

El flujo de fluidos o sistemas de fluidos, a través de conductos circulares y espacios anulares, es uno de los aspectos comúnmente encontrados en el campo de la ingeniería; especialmente en la perforación, terminación y reparación de pozos petroleros.

Por lo tanto, las características reológicas o de flujo de los fluidos deberán de ser bien definidas, a fin de diseñar adecuadamente los requerimientos de potencia necesaria para circularlos.

Además, en el diseño de sistemas de fluidos y en el comportamiento de flujo a diferentes condiciones; así como el efecto de diversos contaminantes sobre los fluidos, es posible obtenerlos solamente a partir de un estudio reológico o de las variaciones en sus propiedades reológicas.

2.1.1.1. Reología.

Es la rama de la física que trata sobre la mecánica de los cuerpos deformables. Es la ciencia de la deformación y flujo de los materiales.

En este trabajo, la reología trata el estudio de las características de flujo de un fluido de perforación y como estas características afectan el movimiento del fluido.

Se han hecho mediciones específicas en un fluido para determinar los parámetros reológicos del mismo, bajo una variedad de condiciones. Con esta información, se puede diseñar o evaluar el sistema circulatorio en función de como éste logrará con certeza los objetivos deseados.

La reología del fluido de perforación es importante para las siguientes determinaciones:

- Calcular las pérdidas de presión por fricción en la tubería o en el espacio anular.
- Determinar la densidad equivalente de circulación del fluido de perforación.
- Determinar el régimen de flujo en el espacio anular.
- Estimar la eficiencia de la limpieza del pozo.
- Evaluar la capacidad de suspensión del fluido.
- Determinar la velocidad de asentamiento de los recortes.

2.1.1.2. Deformación.

La deformación que sufren los materiales puede ser arbitrariamente dividida en dos tipos generales:

Deformación espontáneamente reversible llamada *elasticidad*.

Deformación irreversible denominada *flujo*.

- **Elasticidad.**

Esta deformación corresponde a una energía mecánicamente recuperable. Es decir, el trabajo empleado en deformar un cuerpo perfectamente elástico, es recuperado cuando el cuerpo es retornado a su forma original indeformada. Por lo que esta deformación elástica es considerada como una función del esfuerzo.

- **Flujo.**

La deformación llamada flujo corresponde a la conversión de la energía mecánica en calor. El trabajo empleado en mantener el flujo es disipado en una forma de calor y no es mecánicamente recuperable. En el flujo, la deformación es una función del corte.

Debido a la similitud que existe entre la resistencia viscosa al flujo y la fricción entre dos superficies sólidas, la resistencia al flujo de un fluido es, algunas veces, denominada "fricción interna".

En este trabajo, el término "viscoso" será utilizado como un término genérico para describir el fenómeno de flujo y no se refiere a un coeficiente particular de viscosidad.

En términos generales, las ecuaciones que describen los efectos viscosos y elásticos, en una forma combinada, son establecidos con base en tres términos principales: Un término elástico que incluye la deformación, uno viscoso que incluye el ritmo de la deformación y un tercer término de inercia, el cual incluye la aceleración.

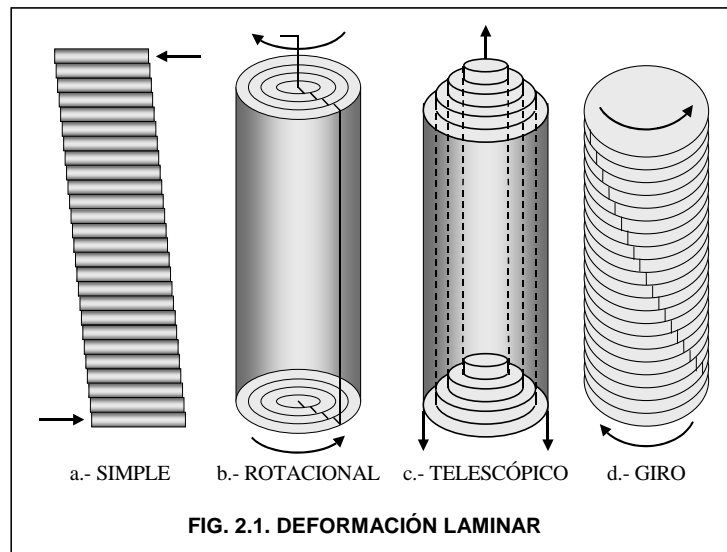
Por lo tanto, desde el punto de vista de la reología, las propiedades mecánicas de todos los materiales pueden ser totalmente descritas en términos de las contribuciones elásticas, viscosas y de inercia.

2.1.1.3. Corte.

El corte es un tipo de deformación muy importante. En donde el corte simple es un caso especial de una deformación laminar y puede ser considerado como un proceso, en el cual planos paralelos infinitamente delgados, se deslizan uno sobre otro; como en un paquete de naipes.

En el corte simple las láminas de fluido son planas, pero el corte o deformación laminar puede ser encontrada en otras geometrías, como se muestra en la figura 2.1.

En esta figura se observa que los tipos de corte mostrados en b y c son muy importantes en reología; pues éstos representan el tipo de flujo encontrado en viscosímetros rotacionales y capilares respectivamente.



2.1.1.4. Fluido.

Un fluido puede ser definido simplemente como una sustancia que tiende a fluir bajo la acción de un esfuerzo, no importando la consistencia de éste. En un fluido, los esfuerzos entre las partículas adyacentes son proporcionales al ritmo de deformación y tienden a desaparecer cuando cesa el movimiento.

Un fluido ideal (fluido viscoso) no puede soportar deformaciones por largos períodos de tiempo, debido a que éstos son aliviados por el flujo. Por supuesto, algunos fluidos pueden exhibir una deformación elástica por períodos de tiempo considerables (períodos infinitamente cortos con respecto al tiempo necesario para obtener un flujo apreciable).

Por lo tanto, un material determinado puede ser considerado como un cuerpo elástico ideal para períodos de tiempo relativamente cortos y como un fluido viscoso ideal para períodos de tiempo relativamente largos.

Independientemente de la geometría del cuerpo y de la deformación, un fluido siempre fluirá en una forma de corte laminar.

Govier y Aziz emplean el término "mezclas complejas" para referirse a todos los fluidos de una fase que son No-Newtonianos en su comportamiento; así como a todas las mezclas multifásicas (fluido-fluido, sólido-fluido), las cuales son capaces de fluir a través de un conducto. Esta clasificación se muestra en la Tabla 2.1.

TABLA 2.1				
CLASIFICACIÓN DE MEZCLAS COMPLEJAS				
DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL EFECTO DE LA CONDICIÓN DE LA FASE SOBRE SU COMPORTAMIENTO REOLÓGICO				
UNA FASE	MULTIFÁSICOS (GAS-LÍQUIDO, LÍQUIDO-LÍQUIDO, GAS-SÓLIDO, LÍQUIDO-SÓLIDO)			
	DISPERSIÓN FINA	DISPERSIÓN GRUESA	MACRO MEZCLA	ESTRATIFICADO
	SEUDOHOMOGÉNEO		HETEROGÉNEO	
HOMOGÉNEO VERDADERO	LAMINAR O TURBULENTO	SOLO TURBULENTO		
COMPORTAMIENTO COMO DE UNA FASE		COMPORTAMIENTO DE FLUJO COMO MULTIFÁSICO		

El término mezclas complejas es solamente una conveniencia y se refiere a un fluido o sistema de fluidos, para los cuales la mecánica de fluidos convencional (newtonianos - una fase) no se aplica.

- **Mezclas de una fase**

Los fluidos de una fase son verdaderamente homogéneos y aun cuando su comportamiento de flujo no siempre es simple, este comportamiento no es complicado por la variación en la concentración de las fases.

- **Mezclas multifásicas**

Estas mezclas pueden ser descritas de acuerdo con las condiciones reales de flujo y la distribución de cada una de las fases; así, es posible definir:

- **Dispersión Fina**

- Pequeñas burbujas de gas, gotas de líquidos inmiscibles o partículas sólidas más o menos uniformemente dispersas en una fase líquida continua, o bien, partículas sólidas o gotas de líquidos más o menos uniformemente distribuidas en una fase gaseosa continua.

- **Dispersión Gruesa**

- Burbujas de gas, gotas de líquido inmiscible o partículas sólidas grandes y dispersas en una fase continua líquida; o grandes gotas de líquido o partículas sólidas dispersas en una fase continua de gas.

- **Macro-Mezclas**

- Mezcla altamente turbulenta de gas y líquido o de líquidos inmiscibles bajo condiciones de flujo en donde ninguna de las fases es continua.

- **Estratificado**

- Mezcla de gas-líquido o dos líquidos inmiscibles, bajo condiciones de flujo donde ambas fases son continuas.

- **Fluido pseudohomogéneo**

Ya sea que una dispersión fluido-fluido o fluido-sólido se comporte como un fluido homogéneo o no, dependerá del grado de turbulencia del flujo o de la velocidad de separación de las fases, la cual a su vez depende del tamaño, forma, densidad y concentración de las partículas, así como de la densidad y viscosidad del fluido.

2.1.2. Modelos reológicos.

Los modelos reológicos tienen la intención de proporcionar apoyo en la caracterización del flujo de fluidos. No solo, los modelos comúnmente utilizados describen completamente las características reológicas de los fluidos de perforación en toda su gama de velocidad de corte. Para entender a detalle el comportamiento del fluido, es necesario tener conocimiento de los modelos reológicos combinado con experiencia práctica.

Modelo de Bingham. El modelo reológico mas usado comúnmente en los fluidos de perforación es el modelo de Bingham. Este modelo describe un fluido en el que, la relación esfuerzo cortante/velocidad de corte es lineal una vez el esfuerzo cortante específico ha sido excedido.

Los dos parámetros, la viscosidad plástica y el punto de cedencia, son utilizados para describir este modelo. Debido a que estas constantes son determinadas de las velocidades de corte entre 511 seg^{-1} y 1022 seg^{-1} , este modelo caracteriza un fluido en el rango mas alto de la velocidad de corte.

Modelo ley de potencias. Este es usado para describir el flujo de los fluidos de perforación pseudoplástico. Este modelo describe un fluido en el que, el esfuerzo de corte vs velocidad de corte es una línea recta cuando está en una grafica log-log. Ya que las constantes reológicas, n y k, de este modelo son determinadas de datos de gradientes de velocidad intermedio, que representa mas a un fluido real en una amplia gama de velocidades de corte.

Modelo ley de potencias modificado (Herschel-Buckley). El modelo de ley de potencia modificado o de Herschel-Buckley es usado para describir el flujo de un fluido de perforación pseudoplástico, el cual requiere un esfuerzo de cedencia (punto de cedencia) para fluir. Una gráfica del esfuerzo cortante menos el punto de cedencia vs velocidad de corte es una línea recta con coordenadas log-log. Este modelo tiene la ventaja del modelo de ley de potencia y describe un poco mas el flujo de un fluido de perforación, ya que incluye un valor de cedencia.

Las características de flujo de un fluido de perforación son controladas por la viscosidad del fluido base (la fase continua) y algunas partículas sólidas, aceite, o gases dentro del fluido (las fases discontinuas) y la velocidad de flujo. Algunas interacciones entre la fase continua y discontinua, químicas o físicas, tienen un efecto sobre los parámetros reológicos de un fluido de perforación. Las constantes calculadas mediante los modelos de Bingham, ley de potencias y otros modelos son únicamente indicadores, que son comúnmente usados para regir el condicionamiento del fluido para obtener las propiedades reológicas deseadas.

2.1.3. Análisis matemático del modelo reológico ley de potencias.

Los parámetros reológicos n y K se pueden calcular de los dos puntos de referencia, la velocidad de corte y el esfuerzo cortante. Ya que es raro que una grafica log-log de todo dato reológico sea una línea recta, es mejor determinar n y k en las velocidades de corte que existen dentro de la tubería y en el espacio anular. La mejor precisión resultará del uso de n y k en los rangos de velocidad de corte de 5 a 200 seg^{-1} para el espacio anular y en los rangos de velocidad de corte de 200 a 1000 seg^{-1} para el interior de la tubería.

Para determinar las constantes de la ley de potencias, en la práctica se usan lecturas de 3 rpm y 100 rpm para el bajo rango de velocidad de corte y las de 300 rpm y 600 rpm para altos rangos de velocidad de corte. Si se utiliza un instrumento de dos velocidades, la lectura de 100 rpm se puede estimar de los datos de las lecturas 300 rpm y 600 rpm usando la siguiente ecuación:

$$R_{100} = \frac{R_{300}^{2.59}}{R_{600}^{1.59}} \quad (2.1)$$

Donde:

- R₁₀₀= Lectura del viscosímetro a 100 rpm
- R₃₀₀= Lectura del viscosímetro a 300 rpm
- R₆₀₀= Lectura del viscosímetro a 600 rpm

Las formulas para n y k son:

$$n = \frac{\log\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)}{\log\left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right)} \quad (2.2)$$

$$k = \frac{\tau_2}{\gamma_2^n} \quad (2.3)$$

Donde:

n= índice de comportamiento de flujo [adimensional]

k= índice de consistencia del fluido [dina seg⁻¹/cm²]

τ₁= esfuerzo cortante a la velocidad de corte 1 [lb/pie²]

τ₂= esfuerzo cortante a la velocidad de corte 2 [lb/pie²]

γ₁= velocidad de corte 1 [seg⁻¹]

γ₂= velocidad de corte 2 [seg⁻¹]

Utilizando los datos obtenidos a 600 rpm y 300 rpm, los cálculos de los parámetros a ser usados en el interior de la tubería son:

$$n_{TP} = \frac{\log\left(\frac{R_{600}}{R_{300}}\right)}{\log\left(\frac{1022}{511}\right)} = 3.32 \log\left(\frac{R_{600}}{R_{300}}\right) \quad (2.4)$$

$$k_{TP} = \frac{5.11R_{300}}{511^{n_{TP}}} \text{ ó } \frac{5.11R_{600}}{1022^{n_{TP}}} \quad (2.5)$$

Utilizando los datos obtenidos a 100 rpm y 3 rpm, los cálculos de los parámetros a ser usados en el espacio anular son:

$$n_{EA} = \frac{\log\left(\frac{R_{100}}{R_3}\right)}{\log\left(\frac{170.2}{5.11}\right)} = 0.657 \log\left(\frac{R_{100}}{R_3}\right) \quad (2.6)$$

$$k_{EA} = \frac{5.11R_{100}}{170.2^{n_{EA}}} \text{ ó } \frac{5.11R_3}{511^{n_{EA}}} \quad (2.7)$$

Utilizando los datos obtenidos a 100 rpm y 3 rpm, los cálculos de los parámetros a ser usados en el cálculo de la velocidad de asentamiento son:

$$n_s = 0.657 \log \left(\frac{R_{100}}{R_3} \right) \quad (2.8)$$

$$k_s = \frac{5.11R_{100}}{170.2^{n_s}} \text{ ó } \frac{5.11R_3}{511^{n_s}} \quad (2.9)$$

La ecuación general de ley de potencias para la viscosidad efectiva [cP] es:

$$\mu_e = 100k\gamma^{n-1} \quad (2.10)$$

La viscosidad efectiva en la tubería es:

$$\mu_{e_{TP}} = 100k_{TP} \left(\frac{96V_{TP}}{D} \right)^{(n_{TP}-1)} \left(\frac{3n_{TP} + 1}{4n_{TP}} \right)^{n_{TP}} \quad (2.11)$$

Donde:

$$V_{TP} = \frac{0.408Q}{D^2} \quad (2.12)$$

V_{TP} = Velocidad promedio en la tubería [pies/seg].

Q = velocidad de flujo [gal/min].

D = diámetro de la tubería [pulg].

La viscosidad efectiva en el espacio anular es:

$$\mu_{e_{EA}} = 100k_{EA} \left(\frac{144V_{EA}}{D_2 - D_1} \right)^{(n_{EA}-1)} \left(\frac{2n_{EA} + 1}{3n_{EA}} \right)^{n_{EA}} \quad (2.13)$$

Donde:

$$V_{EA} = \frac{0.408Q}{(D_2^2 - D_1^2)} \quad (2.14)$$

V_{EA} = Velocidad promedio en el espacio anular [pies/seg].

Q = velocidad de flujo [gal/min].

D_1 = diámetro interior del espacio anular [pulg].

D_2 = diámetro exterior del espacio anular [pulg].

Las viscosidades efectivas $\mu_{e_{TP}}$ y $\mu_{e_{EA}}$ pueden ser usadas para determinar las pérdidas de presión.

La viscosidad efectiva del fluido circundante, en una partícula de asentamiento es:

$$\mu_{e_s} = 100k_s \left(\frac{12V_s}{D_p} \right)^{(n_s-1)} \quad (2.15)$$

Donde:

$$\gamma_s = \frac{12V_s}{D_p} \quad (2.16)$$

γ_s = velocidad de corte de asentamiento [1/seg].

V_s = velocidad de asentamiento [pies/seg].

D_p = diámetro equivalente de la partícula [pulg].

La viscosidad efectiva μ_{es} puede ser usada para determinar la velocidad de asentamiento de sólidos.

2.2. Pérdidas de presión por fricción.^{3,12,13,15,17,18}

2.2.1. Introducción.

La utilización apropiada de la potencia hidráulica de la bomba es uno de los factores de mayor importancia en las operaciones de perforación rotatoria.

Por lo tanto, con la finalidad de emplear la energía hidráulica disponible del equipo, en una forma más eficiente, se requiere del entendimiento de los componentes del sistema circulatorio del pozo, los cuales consumen potencia; así como de la determinación analítica de la presión existente en varios puntos del sistema hidráulico del pozo.

La determinación de las fuerzas de fricción en el sistema circulatorio del pozo es una tarea bastante complicada de describir matemáticamente. No obstante, a pesar de la complejidad del sistema, el efecto de esas fuerzas de fricción deberá de ser calculadas, a fin de poder determinar adecuadamente los siguientes parámetros:

- a) La presión de fondo estática y dinámica durante las operaciones de perforación y cementación.
- b) La densidad equivalente de circulación durante las operaciones de perforación y cementación.
- c) El programa hidráulico del pozo (gasto de flujo, presión de bombeo y tamaño óptimo de las toberas de barrena).
- d) Capacidad de acarreo de los recortes generados por la barrena.
- e) Presiones de empuje y succión durante los viajes.
- f) Las presiones superficiales y de fondo del pozo, a diferentes gastos de circulación, generadas durante las operaciones de control del pozo.

La determinación de las caídas de presión por fricción en las diferentes secciones del pozo se basa principalmente en las leyes que rigen la mecánica de los fluidos y la aplicación de las siguientes leyes físicas de la dinámica de fluidos:

-
- a) Ecuación de Energía o Ley de la Conservación de Energía.
 - b) Ecuación de Continuidad o Ley de la Conservación de Masa.
 - c) Ecuación de Momento o la aplicación de la Segunda Ley de Newton.

Por lo tanto, las ecuaciones que describen el comportamiento de flujo del fluido de perforación son obtenidas a partir de la aplicación de las leyes anteriores, en combinación con el modelo reológico o de flujo del fluido y la correspondiente ecuación de estado.

En la rama de la perforación de pozos, los modelos reológicos comúnmente empleados son:

- a) Modelo Plástico de Bingham.
- b) Modelo de Ley de Potencias.
- c) Modelo de Ley de Potencias Modificado.

En tanto que las ecuaciones de estado más utilizadas son:

- a) Fluido Incompresible.
- b) Fluido Compresible
 - Ecuación de los gases ideales
 - Ecuación de los gases reales

En este trabajo únicamente se tratará el caso de los fluidos incompresibles fluyendo en régimen laminar, transicional y turbulento.

2.2.2. Ecuación de balance de energía.

La ecuación de balance de energía es un postulado que establece el balance entre el contenido de energía inicial en un sistema, la energía externa la cual puede ser adicionada o removida del sistema y el contenido final de energía en el sistema mismo.

El principio de la conservación de la energía establece que el cambio de energía en un sistema es igual a la energía que entra al sistema menos la energía que sale del sistema, más o menos el trabajo y calor adicionado o extraído del sistema.

Las formas de energía incluidas en la ecuación son:

- U : Energía interna por unidad de masa [Nm]
- $V^2/2g_c$: Energía cinética por unidad de masa [Nm]
- gZ/g_c : Energía potencial por unidad de masa [Nm]
- P/ρ : Presión-volumen o energía de compresión [Nm]
- Q : Calor adicionado o removido por unidad de masa [Nm]
- W : Trabajo por unidad de masa, realizado por o sobre el sistema [Nm]

Considere un sistema general de flujo como el mostrado en la figura 2.2, bajo condiciones de flujo estacionario, donde fluye un fluido incompresible. La ecuación de balance de energía puede ser expresada mediante:

$$U + \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2g_c} + \frac{gZ}{g_c} = Q + W \quad (2.17)$$

La ecuación 2.17 puede ser expresada en los siguientes términos:

$$\int dU + \int d\frac{P}{\rho} + \frac{1}{g_c} \int V dV + \frac{g}{g_c} \int dZ = Q + W \quad (2.18)$$

De acuerdo con las leyes de la termodinámica, la entalpia H está definida por:

$$\int dH = \int dU + \int d\frac{P}{\rho} = \int T dS + \int \frac{1}{\rho} dP \quad (2.19)$$

pero:

$$\int T dS = Q + F \quad (2.20)$$

por lo tanto, introduciendo estas dos relaciones (Ecs. 2.19 y 2.20) en la expresión 2.18, resulta:

$$\int \frac{1}{\rho} dP + \frac{1}{g_c} \int V dV + \frac{g}{g_c} \int dZ + W - F = 0 \quad (2.21)$$

La expresión 2.21 es conocida como la ecuación de la energía mecánica, en donde el término F es la pérdida de presión por fricción por unidad de masa. El término F incluye todas aquellas pérdidas de energía degradada de la energía interna como un resultado de la irreversibilidad y en forma general, se expresa por dPf/ρ .

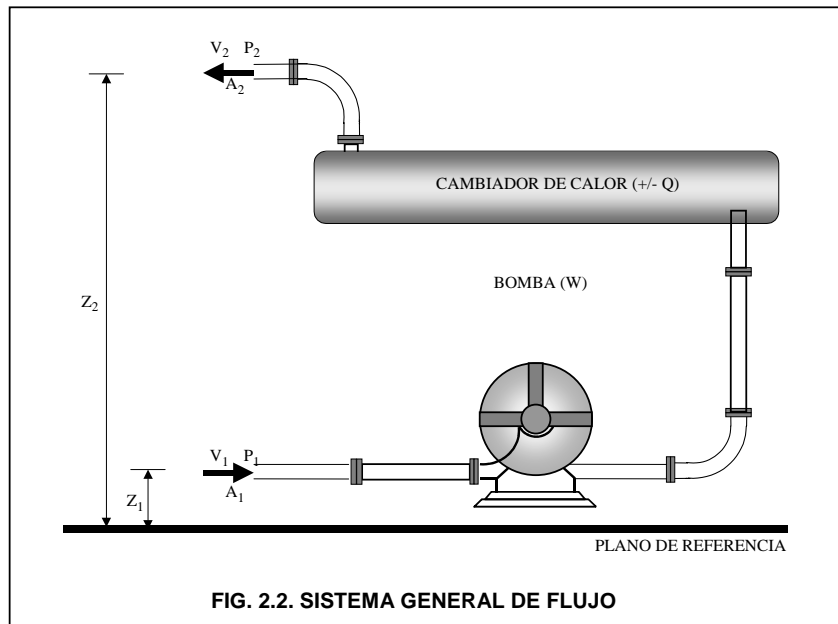


FIG. 2.2. SISTEMA GENERAL DE FLUJO

Por otro lado, para un fluido incompresible se tiene:

$$\int \frac{1}{\rho} dP = \frac{1}{\rho} \int P \quad (2.22)$$

Finalmente, suponiendo que el fluido no realiza ningún trabajo, ni el medio efectúa trabajo sobre el fluido ($W = 0$), la ecuación de la energía mecánica puede ser expresada, en forma diferencial:

$$\frac{dP}{\rho} + V \frac{dV}{g_c} + \frac{g}{g_c} dZ - \frac{dP_f}{\rho} = 0 \quad (2.23)$$

En los problemas de flujo de fluidos, el término dP_f deberá de ser evaluado separadamente a partir de la ecuación de balance de momento y de la ecuación constitutiva del fluido.

2.2.3. Régimen de flujo.

Cuando un fluido fluye a través de un conducto, éste puede fluir ya sea en régimen laminar, transicional o turbulento.

La distinción entre estos regímenes de flujo fue primeramente observada por Osborne Reynolds. Los experimentos realizados por Reynolds mostraron que a una velocidad suficientemente baja un fluido fluye uniformemente en forma de láminas, mientras que a velocidades mayores el movimiento del fluido se torna caótico.

Además, Reynolds mostró que el criterio para romper el movimiento laminar del fluido y la transición al flujo turbulento depende de una cantidad adimensional denominada como Número de Reynolds.

El concepto del número de Reynolds, originalmente determinado empíricamente, es de gran importancia en la solución de los problemas de flujo y relaciona las fuerzas de inercia a las fuerzas viscosas que son desarrolladas por el fluido en movimiento.

Para el flujo de fluidos en tuberías, el Número de Reynolds (Re) está definido mediante:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de Inercia}}{\text{Fuerzas Viscosas}} = \frac{\frac{\rho V^2}{D}}{\frac{\mu V}{D^2}}$$

Por lo tanto:

$$Re = \frac{DV\rho}{\mu} \quad (2.24)$$

2.2.3.1. Flujo laminar.

Cuando un fluido fluye en régimen laminar a través de un conducto, las partículas de fluido se mueven en línea recta, paralelas al eje longitudinal del conducto y las capas adyacentes del fluido se deslizan unas sobre otras sin mezclarse.

En éste régimen de flujo, las caídas de presión por fricción son debidas únicamente al esfuerzo cortante originado por el deslizamiento entre las capas adyacentes del fluido.

En este caso, las expresiones que relacionan el gasto de flujo a las pérdidas de presión por fricción se pueden desarrollar basados en las ecuaciones constitutivas del fluido (modelos reológicos).

- **Relación de Hagen-Poiseuille**

La relación de Hagen-Poiseuille es aplicable al flujo laminar estacionario de un fluido incompresible, Newtoniano, fluyendo a través de un conducto circular de sección transversal uniforme.

Mediante la aplicación de las ecuaciones de estado, continuidad, y momento; así como la ecuación constitutiva del fluido se obtiene:

$$\frac{dP_f}{dx} = \frac{32 V \mu}{g_c D^2} \quad (2.25)$$

Donde:

g_c = Constante gravitacional [m/s^2]

V = Velocidad [m/s]

D = Diámetro de la tubería [m]

μ = Viscosidad [cP]

La relación teórica expresada por la ecuación 2.25, ha sido ampliamente verificada mediante determinaciones experimentales y es completamente válida para las condiciones supuestas; es decir, flujo isotérmico, estacionario e incompresible de un fluido Newtoniano.

Para fluidos no-Newtonianos es posible derivar expresiones análogas, mediante la aplicación de la ecuación constitutiva del fluido correspondiente.

2.2.3.2. Flujo turbulento.

El flujo turbulento se caracteriza por la fluctuación en los componentes de la velocidad en todas direcciones; es decir, el flujo se vuelve caótico y las partículas de fluido se mueven en todas direcciones.

Fuera de la región laminar, el análisis teórico de las pérdidas de presión por fricción llega a ser extremadamente complejo. Sin embargo, se ha realizado una gran cantidad de trabajo experimental, los cuales han definido la relación entre los factores que afectan las pérdidas de presión por fricción en régimen turbulento.

Mediante la aplicación del análisis dimensional, las pérdidas de presión por fricción y el gasto volumétrico de flujo se relacionan en función del llamado factor de fricción.

- **Factor de fricción**

El factor de fricción es un parámetro adimensional que indica el nivel de esfuerzo cortante en la pared del conducto. Por lo que el factor de fricción es la relación entre el esfuerzo cortante en la pared (τ_w) y la energía cinética por unidad de volumen del fluido; es decir:

$$f = \frac{2 \tau_w g_c}{\rho V^2} \quad (2.26)$$

pero de un balance de fuerzas se puede obtener:

$$\tau_w = -\frac{D}{4} \frac{dP_f}{dx} \quad (2.27)$$

Donde:

τ_w = Esfuerzo cortante en la pared [N/m^2]

ρ = Densidad [gr/cm^3]

g_c = Constante gravitacional [m/s²]
 V = Velocidad [m/s]
 D = Diámetro de la tubería [m]

por lo que f está definida por:

$$\frac{dP_f}{dx} = \frac{2 f \rho V^2}{g_c D} \quad (2.28)$$

La expresión 2.28 es conocida como la ecuación de Fanning, la cual es válida para el flujo turbulento de cualquier fluido, siempre y cuando el valor del factor de fricción f sea apropiadamente determinado.

En régimen laminar el valor de f deberá de ser tal que las ecuaciones 2.25 y 2.28 proporcionen el mismo valor para el gradiente de presión por fricción. Así, igualando estas expresiones y resolviendo para f se tiene que, para flujo laminar:

$$f = \frac{16}{Re} \quad (2.29)$$

2.2.4. Determinación en el campo de las pérdidas de presión por fricción.

La determinación analítica de las caídas de presión por fricción en un sistema circulatorio del pozo, proporciona resultados, si no exactos, sí bastante cercanos a los valores reales medidos en el equipo de perforación.

Los valores determinados son aplicables en la mayoría de los casos, pese a las suposiciones involucradas. Sin embargo, en ciertas situaciones, tales como brotes, optimización de la hidráulica, etc., es necesario determinar las caídas de presión por fricción a varios gastos de flujo en una forma más exacta.

Es posible medir directamente en el equipo de perforación la caída de presión por fricción en el sistema a varios gastos de circulación, obteniendo de esta manera valores reales de las pérdidas de presión a través del sistema hidráulico del pozo.

El procedimiento básicamente consiste en circular el fluido de perforación a diferentes gastos de circulación (mínimo dos diferentes gastos) y medir la presión de bombeo superficial necesaria para vencer las pérdidas por fricción. Esto deberá realizarse colocando la barrena o extremo de la sarta de perforación a la profundidad de interés.

Si se consideran las pérdidas de presión por fricción a través de un sistema circulatorio, excluyendo la barrena, como ΔP_p , es decir:

$$\Delta P_p = \Delta P_{CS} + \Delta P_{TP} + \Delta P_{LB} + \Delta P_{TPa} + \Delta P_{LBa} \quad (2.30a)$$

Donde ΔP_p es denominada como la caída de presión parásita (caída de presión en el sistema excluyendo a la barrena), debido a que ésta representa la presión necesaria para circular el fluido de perforación, la cual no produce beneficio alguno. Es decir, es una presión que es necesario gastar si se desea circular el lodo a través del pozo.

Por lo tanto, la presión superficial de bombeo definida por la expresión:

$$\Delta P_s = \Delta P_{CS} + \Delta P_{TP} + \Delta P_{LB} + \Delta P_b + \Delta P_{TPa} + \Delta P_{LbA} \quad (2.30b)$$

y sustituyendo en la ecuación 2.30a, se reduce a:

$$P_s = \Delta P_p + \Delta P_b \quad (2.31a)$$

De la expresión 2.31a, la caída de presión a través de las toberas de la barrena, ΔP_b , puede ser determinada con exactitud mediante la siguiente expresión:

$$\Delta P_b = \frac{156Q^2\rho}{(D_{Tob1}^2 + D_{Tob2}^2 + \dots)^2} \quad (2.31b)$$

donde:

- ρ = Densidad del fluido de perforación, [lb/gal]
- Q = Gasto volumétrico de flujo, gpm
- D_{Tob} = diámetro de las toberas de la barrena [1/32 pulg]
- ΔP_b = Caída de presión a través de la barrena, [lb/pulg²]

en tanto que la presión superficial de bombeo (P_s), es directamente medida en el manómetro de la tubería de pie. De aquí, es posible despejar la caída de presión parásita; es decir:

$$\Delta P_p = P_s - \Delta P_b \quad (2.31c)$$

Como se mencionó anteriormente, las pérdidas de presión por fricción dependen de las dimensiones del conducto a través del cual se circula el fluido, las características reológicas y físicas del fluido, el gasto de flujo y el régimen de flujo.

En régimen laminar, la caída de presión por fricción es una función lineal de la velocidad de flujo o del gasto de circulación (ecuación 2.25):

$$\Delta P = f(V) = f(Q)$$

En tanto que en régimen de transición o turbulento, la pérdida por fricción es una función de la velocidad de flujo o del gasto al cuadrado (ecuación 2.28):

$$\Delta P = f(V^2) = f(Q^2)$$

Dependiendo principalmente de las características del fluido y del gasto de circulación, a través del sistema circulatorio del pozo se pueden presentar varios regímenes de flujo (turbulento y/o transicional en el interior de la sarta de perforación y laminar y/o transicional en el espacio anular), por lo que las pérdidas de presión parásitas se pueden representar mediante:

$$\Delta P_p = K Q^n \quad (2.32)$$

donde:

- K = Constante denominada caída de presión por fricción por gasto unitario, la cual depende de las características del fluido y de la geometría del pozo, kg/cm²/gpm.

n = Constante que depende principalmente del régimen de flujo y de las características del fluido, adim.

Scott demostró que el valor de la constante n varía entre un valor tan bajo como 1.12 y tan alto como 1.96. Como una aproximación, el valor de n puede ser considerado igual a 1.86.

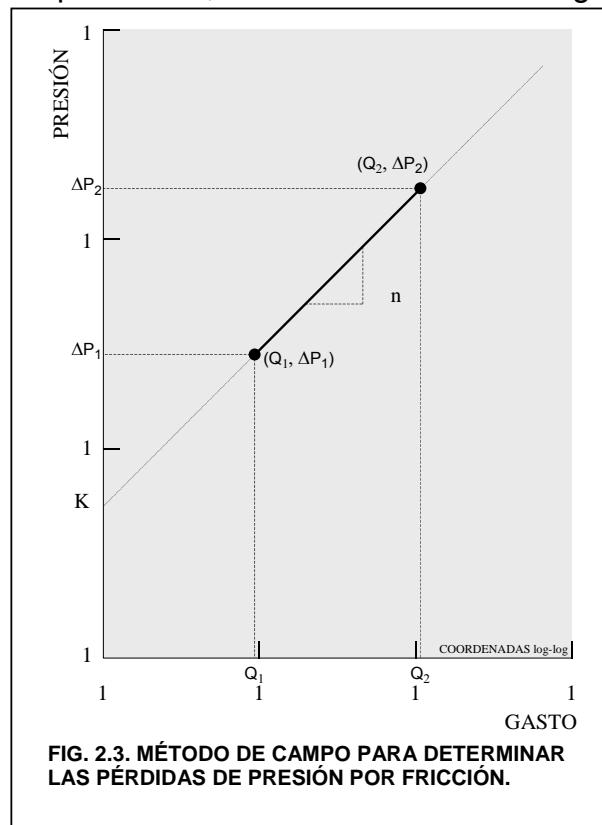
De aquí, es posible afirmar que expresión 2.32 expresa la caída de presión parásita a través del sistema circulatorio del pozo, excluyendo la barrena, como una función del gasto de circulación.

2.2.4.1. Determinación de los valores n y K .

Los valores de las constantes n y K pueden ser determinados directamente en equipo de perforación, circulando el fluido a varios gastos y midiendo la presión superficial de bombeo (presión registrada en el manómetro de la tubería de pie).

Mediante la aplicación de la expresión 2.31b, se determina la caída de presión a través de la barrena a cada uno de los gastos y de aquí la caída de presión parásita en el sistema (ecuación 2.31c).

Una vez determinadas las caídas de presión parásitas a cada uno de los gastos de flujo, el valor de las constantes n y K se pueden determinar mediante una gráfica logarítmica de ΔP_p contra Q , como se muestra en la figura 2.3.



La expresión 2.32 representa una línea recta cuando se grafica en coordenadas logarítmicas la presión contra el gasto, es decir:

$$\log(\Delta P_p) = \log(K) + n \log(Q) \quad (2.33)$$

Donde n representa la pendiente de la recta y K es el valor de la ordenada al origen.

En caso de que se cuente con más de dos valores de presión superficial de bombeo contra gasto, un ajuste lineal por mínimos cuadrados proporcionará una mejor determinación de las constantes n y K .

En el caso de que solo se cuente con dos valores, entonces:

$$n = \frac{\log\left(\frac{\Delta P_{p_1}}{\Delta P_{p_2}}\right)}{\log\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)} \quad (2.34)$$

y

$$K = \frac{\Delta P_{p_1}}{Q_1^n} = \frac{\Delta P_{p_2}}{Q_2^n} \quad (2.35)$$

Es conveniente aclarar que el procedimiento descrito en esta sección es un método de campo para la determinación de la relación entre las caídas de presión por fricción a través de un sistema hidráulico del pozo y el gasto de flujo; el cual ha sido erróneamente denominado optimización de la hidráulica por el método de campo.

2.2.5. Densidad equivalente de circulación.

Uno de los aspectos más importantes en el cálculo de las caídas de presión por fricción es la determinación de la presión total ejercida en el fondo del pozo.

La presión total en el fondo del pozo se origina por el efecto combinado de la presión hidrostática ejercida por la columna de lodo y la presión ejercida por la circulación.

La presión total ejercida en cualquier punto del pozo, cuando se está circulando un fluido, es igual a la suma de la presión hidrostática en ese punto más las pérdidas de presión por fricción desde ese punto hasta el final del circuito hidráulico (Figura 2.4).

Así, en el fondo del pozo se tiene:

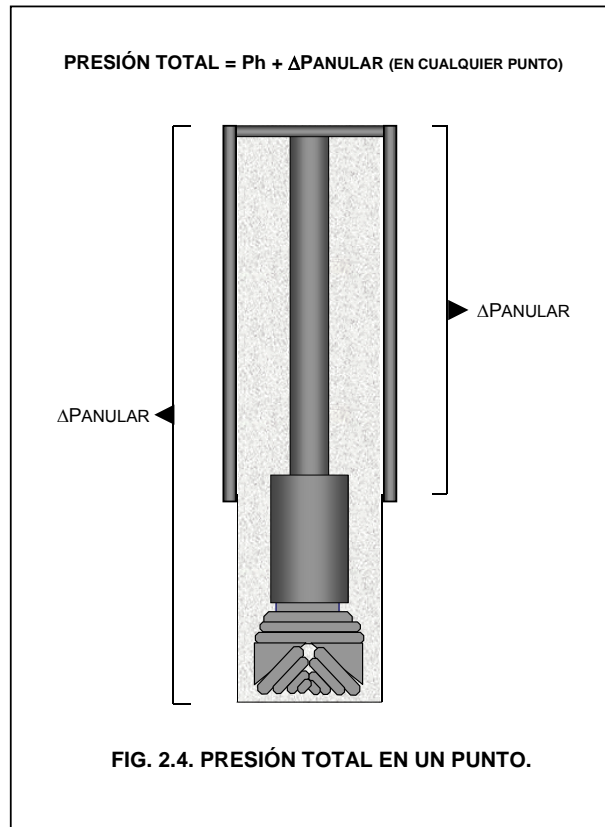
$$P_{\text{fondo}} = P_h + \Delta P_{\text{anular}} \quad (2.36)$$

Es común expresar la presión total en cualquier punto del sistema (fondo del pozo, zapata, etc.) en términos de una densidad de lodo equivalente, denominada densidad equivalente de circulación. Por lo tanto, de la expresión 2.36, la densidad equivalente de circulación se define como:

$$\rho_{ec} = \rho + \frac{10 \Delta P_{anular}}{L} \quad (2.37)$$

donde:

- ρ_{ec} : Densidad equivalente de circulación, [gr/cm³]
- ρ : Densidad del lodo de perforación, [gr/cm³]
- ΔP_{anular} : Caída de presión en el espacio anular desde un punto hasta la superficie, [kg/cm²]
- L : Profundidad total, [m]



2.3. Optimización de la hidráulica. ^{3,19,20,21}

2.3.1. Introducción.

El empleo óptimo de la potencia hidráulica de la bomba de lodos es uno de los aspectos de mayor importancia en las operaciones de perforación, especialmente en lo que a la optimización de ésta se refiere.

Por este motivo, es necesario contar con el conocimiento cabal del equipo hidráulico superficial y sus componentes; así como de la evaluación analítica de la energía hidráulica disponible; asociándose generalmente el término potencia hidráulica con el empleo en el campo de las barrenas.

La principal función de las toberas de la barrena es la de mejorar la acción de limpieza del fluido de perforación en el fondo del pozo, incrementando de esta manera la velocidad de perforación, mediante la remoción "casi inmediata" de los recortes generados y permitir que los dientes de la barrena incidan sobre formación virgen.

Antes de la introducción y empleo de las barrenas de toberas en el campo, la limpieza de los recortes del fondo del pozo era ineficiente y gran parte de la vida de la barrena se consumía remoliendo los recortes; lo cual a su vez generaba problemas en la perforación del pozo.

Por lo tanto, la aplicación de un nivel adecuado de la energía hidráulica disponible en el fondo del pozo, producirá un incremento sustancial en la velocidad de penetración; ya que si se logra obtener una "limpieza perfecta" en el fondo del pozo, los recortes serán removidos con la misma rapidez con que se generan.

De aquí la gran importancia que tiene la determinación del tamaño apropiado de las toberas, la cual es una función de la energía disponible en la barrena y por lo tanto de las caídas de presión por fricción.

De lo antes expuesto es posible establecer que el principal objetivo de la optimización de la hidráulica de perforación es el de maximizar una función objetivo que permita obtener una limpieza eficiente del fondo del pozo y de la barrena y no la de hacer agujero, aun cuando en formaciones muy suaves el chorro del lodo puede por sí solo ayudar a "hacer agujero".

Es decir, en lo que hacer agujero se refiere, la hidráulica de perforación se emplea únicamente para lograr una limpieza eficiente del fondo del pozo.

2.3.2. Hidráulica óptima.

La hidráulica de perforación óptima se define como el balance apropiado entre los elementos de la hidráulica con el fin de obtener una limpieza adecuada del fondo del agujero y de la barrena, empleando la potencia hidráulica disponible tan eficientemente como sea posible.

En el análisis de la optimización de la hidráulica de perforación, se consideran los siguientes elementos:

Gasto de flujo: Determina la velocidad anular del fluido y las caídas de presión por fricción en el sistema circulatorio del pozo.

Presión de bombeo: Determina la velocidad del fluido en las toberas de la barrena.

Relación gasto-presión de bombeo: Determina la potencia hidráulica disponible en la barrena.

Fluido de perforación: Determina las pérdidas de presión por fricción en el sistema y la velocidad de acarreo de los recortes.

A la fecha, no todos los modelos desarrollados, han alcanzado la verdadera optimización de la hidráulica de perforación, que permita una mejor definición del efecto de la hidráulica sobre:

- La velocidad de penetración.
- Los costos de operación.
- El desgaste de la barrena.
- Los problemas potenciales del agujero (erosión, etc.).
- La capacidad de acarreo de los recortes.

Por otro lado, aún en la actualidad existen desacuerdos en el sentido de cual o cuales de los parámetros deberán de ser empleados para indicar el nivel adecuado de limpieza hidráulica.

Sin embargo, actualmente los parámetros o criterios de diseño hidráulico más comúnmente empleados incluyen:

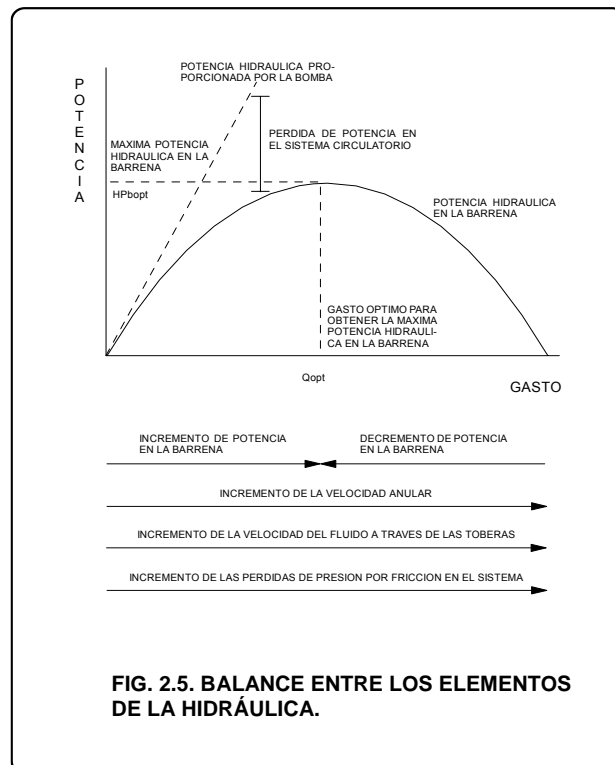
- La máxima potencia hidráulica en la barrena.
- La máxima fuerza de impacto hidráulico.
- La máxima velocidad del fluido en las toberas de la barrena

Recientemente, aun cuando no muy bien definido, la velocidad del “flujo cruzado” en el fondo del pozo ha sido definida como un criterio alternativo de diseño hidráulico. Investigaciones recientes han demostrado que la maximización de este parámetro permite una mejor limpieza del fondo del pozo. Sin embargo a la fecha no ha sido posible la definición completa de este parámetro.

Así, la práctica común en el diseño de un programa hidráulico optimizado consiste en la determinación apropiada de los gastos de flujo y tamaño de toberas de la barrena, para un pozo y fluido determinado, que como resultado permitan que alguno de los criterios de optimización sea máximo.

La decisión con respecto a como definir el balance apropiado entre los elementos de la hidráulica hace de ésta una de las fases más difíciles de la optimización de la perforación.

No obstante, el balance entre los elementos de la hidráulica puede ser representado por la Figura 2.5.



2.3.3. Criterios de optimización.

La práctica de campo ha demostrado que la velocidad de perforación se incrementa conforme la energía hidráulica disponible en el fondo del pozo se incrementa; aumentando así la efectividad del empleo de las barrenas de chorro.

Sin embargo, una vez que se alcanza un nivel de limpieza "perfecta", cualquier aumento de la energía hidráulica en la barrena ya no trae consigo un aumento en la velocidad de penetración.

2.3.3.1. Máxima potencia hidráulica.

Potencia se define como la capacidad de realizar un trabajo por unidad de tiempo, por lo que la potencia hidráulica que el fluido desarrolla al moverse a través del sistema circulatorio está definida por la relación gasto-presión.

- **Potencia hidráulica superficial disponible.**

La potencia hidráulica superficial disponible de la bomba está definida por la siguiente relación:

$$HP_s = \frac{P_s Q}{1714 E_v} \quad (2.38)$$

Donde:

P_s = Presión superficial de bombeo [lb/pulg²]

Q = Gasto [gal/min]

E_v = Eficiencia volumétrica de la bomba [%]

- **Potencia hidráulica en la barrena.**

La potencia hidráulica en la barrena se expresa mediante:

$$HP_b = \frac{\Delta P_b Q}{1714} \quad (2.39)$$

Donde:

ΔP_b = Caída de Presión en la barrena [lb/pulg²]

Q = Gasto [gal/min]

La potencia hidráulica desarrollada por la bomba se utiliza en parte para vencer la resistencia ofrecida por el sistema circulatorio (pérdidas de presión por fricción parásitas), mientras que el resto disponible, se destina a la barrena.

Si se deseara incrementar la potencia superficial a fin de utilizar la máxima potencia de la bomba, sería necesario aumentar el gasto de circulación, manteniendo la presión de la bomba constante e igual a la presión superficial máxima. Esto traería como consecuencia un incremento en las pérdidas por fricción a través del sistema circulatorio, debido al incremento en el gasto de flujo.

Por lo tanto, gran parte de la potencia superficial desarrollada por la bomba sería destinada a vencer principalmente, la resistencia a la circulación del fluido, a costa de la potencia hidráulica en la barrena.

Lo anterior significa que el parámetro que se requiere maximizar es la potencia hidráulica en la barrena y no la potencia superficial.

2.3.3.2. Máximo impacto hidráulico.

La fuerza de impacto hidráulico se define como la rapidez en el cambio de momento del fluido con respecto al tiempo; es decir, es la fuerza impartida a la formación por el fluido saliendo de las toberas de la barrena e incidiendo sobre el fondo del pozo.

La teoría del impacto hidráulico considera que la remoción de los recortes depende de la fuerza con la cual el fluido golpea el fondo del pozo.

La fuerza del impacto hidráulico (F_b) es proporcional al gasto de flujo (Q) y a la raíz cuadrada de la caída de presión en la barrena (ΔP_b), definida mediante:

$$F_b = \left(\frac{\rho \Delta P_b Q^2}{3332} \right)^{1/2} \quad (2.40)$$

Trabajos experimentales reportados en la literatura han determinado que la velocidad de perforación se incrementa con el incremento en la fuerza de impacto hidráulico. Experimentos más recientes han mostrado que maximizando el impacto hidráulico se maximiza la velocidad del flujo a través del fondo del pozo, obteniéndose así una mayor velocidad de penetración. Por lo tanto, a fin de obtener una mejor limpieza en el fondo del pozo, es necesario maximizar la fuerza de impacto hidráulico en la barrena.

2.3.3.3. Máxima velocidad en las toberas.

Estudios realizados con las primeras barrenas, mostraron que la velocidad de penetración se mejoraba notablemente conforme la velocidad del fluido, a través de las toberas, se incrementaba.

Antes de la introducción de las barrenas de toberas, las bombas se operaban, generalmente, al gasto correspondiente a la mínima velocidad anular requerida para levantar los recortes. En cierto punto, esta práctica actualmente continúa siendo válida.

La velocidad del fluido a través de las toberas (V_n) es proporcional a la raíz cuadrada de la caída de presión en la barrena (ΔP_b) e inversamente proporcional a la densidad del fluido (ρ). De tal manera que ésta puede ser expresada como:

$$V_n = \left(\frac{1114.65 \Delta P_b}{\rho} \right)^{1/2} \quad (2.41)$$

La optimización consiste en seleccionar el tamaño de las toberas de la barrena de tal manera que la presión superficial a un gasto mínimo indispensable para levantar los recortes sea la máxima presión superficial disponible.

Por lo tanto, la velocidad del fluido a través de las toberas de la barrena es máxima cuando la caída de presión en la barrena es máxima, y la caída de presión en la barrena es máxima, cuando la caída de presión por fricción en el sistema es mínima y la presión superficial es máxima.

A su vez, la caída de presión por fricción en el sistema es mínima, cuando el gasto de circulación es mínimo. Por lo que la velocidad del lodo en las toberas es máxima cuando el gasto es mínimo y la presión superficial es máxima.

2.4. Capacidad de acarreo de los recortes.^{3,22,23,24}

2.4.1. Introducción.

Una función importante del fluido de perforación es el transporte de las partículas generadas por la barrena (recortes) hasta la superficie. Esto es comúnmente referido como la capacidad de acarreo de los recortes.

2.4.2. Velocidad terminal de asentamiento.

Cuando una partícula se asienta en el seno de un fluido; la partícula alcanza una velocidad constante, la cual se define como la velocidad terminal de asentamiento.

Cuando la partícula alcanza el equilibrio entre las fuerzas viscosas y las fuerzas gravitacionales, la velocidad de asentamiento es constante y depende de la densidad y viscosidad del líquido, densidad, forma y rugosidad de la partícula y de la forma y área proyectada de la partícula.

Comúnmente, la velocidad de deslizamiento (asentamiento) de una partícula, cuando el fluido está fluyendo, se supone igual a la velocidad terminal de asentamiento de la partícula.

Debido a que el movimiento de los recortes en el espacio anular es complejo, la suposición de que la velocidad terminal de la partícula es la misma que la velocidad de asentamiento es cuestionable.

La capacidad de acarreo de los recortes depende de:

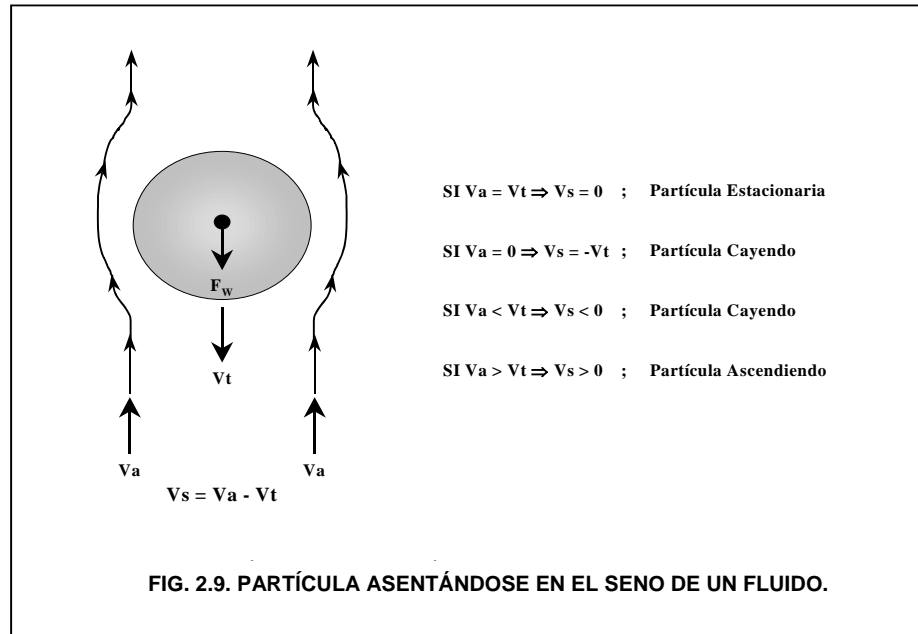
- Gasto de flujo (velocidad anular del fluido)
- Propiedades reológicas del fluido.
- Velocidad de asentamiento de la partícula
- Tamaño y geometría de la partícula
- Concentración de las partículas
- Densidad del fluido
- Geometría del espacio anular (inclinación, excentricidad)
- Rotación de la sarta

Una partícula puede caer en régimen laminar, transicional o en turbulento.

- En régimen laminar, la resistencia que se opone a la caída es causada por las fuerzas viscosas del líquido. Las fuerzas de momento son despreciables.
- En el régimen turbulento, la única resistencia que retarda la caída de las partículas es causada por las fuerzas de momento del líquido. La viscosidad del fluido no tiene efecto alguno.
- Entre los dos regímenes se encuentra la transición, donde ambas, las fuerzas viscosas y de momento retardan la caída de la partícula.

Si el fluido en el espacio anular está fluyendo en régimen turbulento, la partícula caerá en régimen turbulento, en tanto que si el flujo en el espacio anular es laminar, la partícula podrá caer en régimen laminar, transicional o turbulento, dependiendo de la geometría de la partícula y las propiedades viscosas del fluido.

La figura 2.9 muestra la relación entre la velocidad de asentamiento de una partícula (V_s) con respecto a su velocidad terminal de asentamiento (V_t) y la velocidad del fluido (V_a).



Relación de Transporte.

El avance de los recortes hacia la superficie a una velocidad igual a la diferencia entre la velocidad del fluido en el espacio anular y la velocidad de deslizamiento de la partícula se conoce como la velocidad de transporte, definida por:

$$V_T = V_a - V_s \quad (2.42)$$

y la relación de transporte es entonces definido como la velocidad de transporte entre la velocidad anular, por lo tanto:

$$R_T = \frac{V_T}{V_a} = \frac{V_a - V_s}{V_a} = 1 - \frac{V_s}{V_a} \quad (2.43)$$

Para relaciones de transporte positivo, los recortes serán transportados hacia la superficie. De la ecuación 2.42, se observa que para una velocidad de asentamiento de la partícula igual a cero, la velocidad media del recorte será igual a la velocidad anular y la relación de transporte será igual a 1. Conforme la velocidad de deslizamiento se incrementa, la relación de transporte decrece y la concentración de recortes en el espacio anular hacia la superficie se incrementa. Por lo tanto, se puede establecer que la relación de transporte es una medida excelente de la capacidad de acarreo de un fluido de perforación en particular.

Sifferman y colaboradores establecieron que la relación de transporte es una medida apropiada de la capacidad de acarreo de los fluidos.

En operaciones practicas de campo, una relación de transporte de 50% es adecuado para tener una buena limpieza del agujero. Así:

$$\text{Si } R_T = 0.5 \Rightarrow V_{a\min} = 2V_s \Rightarrow Q_{\min} = 2.448 \times V_{a\min} (D_{1TR}^2 - D_{2TP}^2) \quad (2.44)$$

CAPÍTULO 3

CONTROL DE SÓLIDOS

3. Control de sólidos. ^{4,5,8,9}

3.1. Transporte de los sólidos perforados.

Los recortes de perforación deben ser retirados del pozo a medida que son generados por la barrena. Para esto, se hace circular el fluido a través de la barrena, para arrastrar y transportar los recortes a través del espacio anular hasta la superficie. La remoción de estos recortes depende la velocidad de penetración y del tamaño, forma y densidad de los recortes, además de la viscosidad y la velocidad anular del fluido. La deficiente limpieza del pozo genera, además de baja velocidad de penetración, exceso de torsión, fricciones, arrastre, empacamiento del espacio anular y pérdidas de circulación.

3.1.1. Suspender los recortes de formación al suspender la circulación.

Los fluidos de perforación deben suspender los recortes de perforación, los materiales densificantes y aditivos en una amplia variedad de condiciones y, al mismo tiempo, deben permitir la remoción de los recortes por el equipo de control de sólidos. Los sólidos de formación que se sedimentan durante los periodos estáticos pueden generar empacamiento de la sarta y pérdida de circulación.

3.2. Sistema de control de sólidos.

La selección del equipo de control de sólidos tiene como propósito lograr la separación progresiva de los sólidos perforados, considerando su tamaño de partícula y permitiendo que cada equipo optimice el desempeño del siguiente.

Los principales componentes del sistema de control de sólidos, son:

- Línea de flote
- Temblorinas
- Trampas de arena
- Desgasificadores
- Hidrociclones
- Limpiador de lodos
- Centrifugas decantadoras
- Tanques de lodo

El sistema debe tener la capacidad para diferenciar entre los sólidos perforados y el material densificante.

3.2.1. Línea de flote.

A continuación se muestran cuatro tipos de arreglos de la línea de flote y la temblorina primaria.

En la figura 3.1, la temblorina 3 recibirá la mayor parte del fluido y de los sólidos, dando como resultado la inundación de la temblorina, altas pérdidas de lodos y mayores costos en el manejo de desechos de perforación.

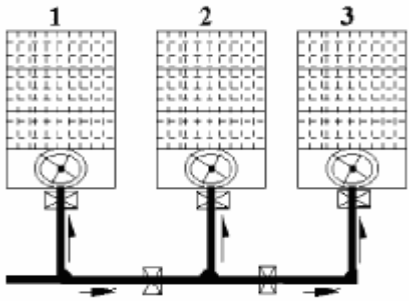


FIGURA 3.1

La figura 3.2 muestra una configuración en la que la tremblorina central recibirá la mayor parte del fluido y de los sólidos. Esta configuración no utiliza por completo las tremblorinas externas, dando como resultado costos generales más elevados, debido a la mayor pérdida de lodos y manejo de desechos.

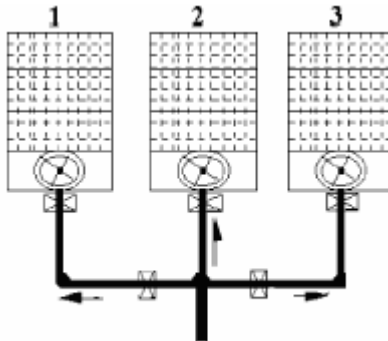


FIGURA 3.2

En la configuración que muestra la figura 3.3, las tremblorinas recibirán una distribución uniforme de fluidos y sólidos, resultando en menores pérdidas de fluidos de perforación y costos operativos generales más bajos; sin embargo, presenta el inconveniente de tener varias intersecciones tipo "T", las cuales provocaran que se pueda tapar y, por su mismo diseño, su desazolve será difícil y tardado, incrementando por este concepto los costos de la perforación.

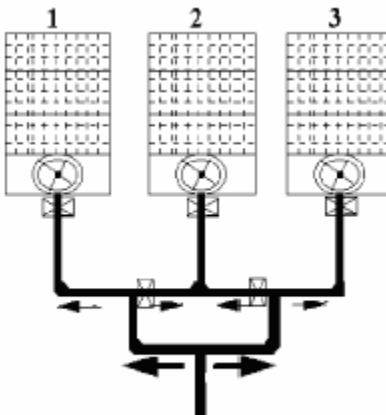


FIGURA 3.3

En la figura 3.4 se muestra el arreglo óptimo del múltiple de la línea de flote, con divisor de línea de flujo para temblorinas secundarias.

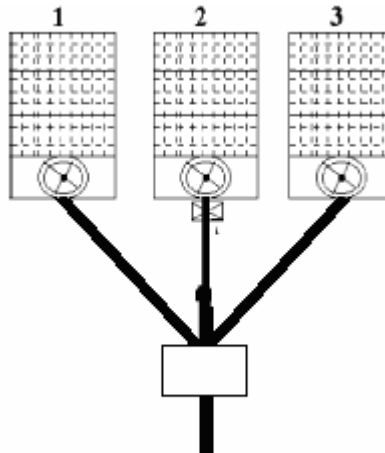


FIGURA 3.4

La configuración recomendada, tomando como base las altas velocidades de perforación esperadas, se ilustran en las figuras 3.3 y 3.4.

3.2.1.1. Separación de arcillas plásticas.

En algunas áreas, las arcillas reactivas plásticas o gelatinosas forman bolas de material que pueden tapar completamente la línea de flote y obstruir las mallas de las temblorinas.

Como se ilustra en la figura 3.5, se recomienda instalar de una a dos conexiones de inyectores de alta presión de 2" en la línea de flote.

Las bombas de lodos pueden bombear a través de estos inyectores para desintegrar cualquier material que pudiera tender a obstruir dicha línea.

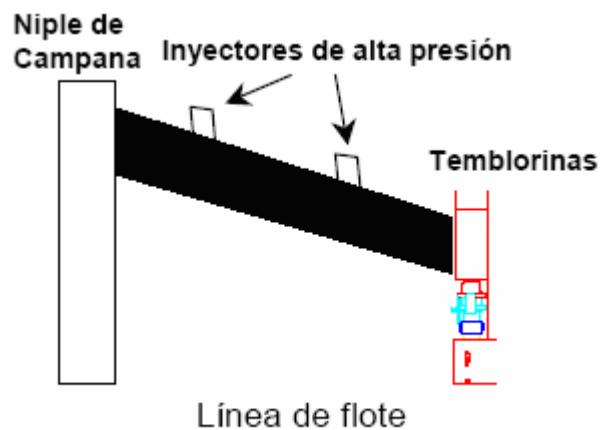


FIGURA 3.5

3.2.2. Temblorinas.

Las Temblorinas es el único aparato removedor de sólidos que hace una separación basado en el tamaño físico de las partículas.

La operación de la temblorina esta en función de:

- Norma de la vibración (tipos de movimientos).
- Dinámica de la vibración (contrapesas).
- Tamaño de la cubierta y su configuración.
- Características de las mallas (tamaño y condición de la superficie)
- Reología del lodo (especialmente densidad y viscosidad)
- Descarga de sólidos (ROP y GPM)

Las recomendaciones de API consisten en instalar suficientes temblorinas para procesar 125% del volumen de circulación de lodo máximo esperado para el pozo, utilizando a su vez las mallas más finas posibles y considerando el aspecto económico. Si bien las propiedades del lodo, velocidad de penetración, tipo de formación perforada, tipo de malla y otros factores afectan el número real de temblorinas requerido, los lineamientos generales se hacen basándose en la experiencia y conforme a los programas de perforación y lodos.

Ventajas.

- Simple para operar.
- Disponibilidad.
- Si el número de la malla es conocido, se puede conocer el tamaño de partícula.
- Capaz de procesar el volumen total de lodo circulado.
- Fácil de inspeccionar.
- Los sólidos pueden ser removidos antes de cualquier degradación mecánica.

Desventajas.

- Son costosas (compra y operación).
- Su montaje necesita gran espacio.
- Dificultad en el acceso a las mallas del fondo, en las temblorinas dobles, para la inspección.
- Produce sólidos húmedos en su descarga.

3.2.2.1. Temblorinas primarias.

El principal objetivo de estas temblorinas es separar los sólidos grandes provenientes del pozo. Se debe asegurar que el tiempo de retención sea mínimo y que la alimentación garantice que no se presente excesiva acumulación de recortes.

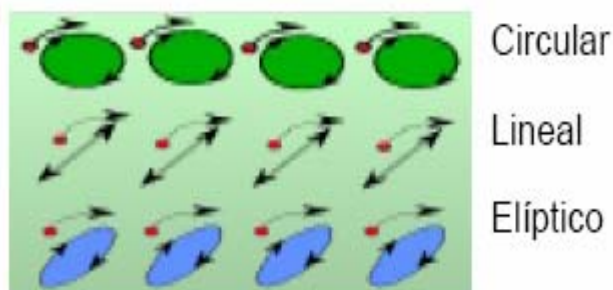


FIGURA 3.6

La figura 3.6 muestra los movimientos básicos de las temblorinas primarias.

El movimiento circular o elíptico balanceado se recomienda para sólidos pegajosos y sólidos grandes. Generalmente la temblorina primaria se utiliza, con ángulo de inclinación cero y contra pesas excéntricas (Figura 3.7).



FIGURA 3.7

Las temblorinas primarias deben recibir el fluido de perforación proveniente de la línea de flote, procesarlo y enviarlo por gravedad a las temblorinas secundarias.

3.2.2.2. Temblorinas secundarias.

El objetivo principal es contar con suficiente capacidad de temblorinas para procesar en forma continua las velocidades de circulación completas del equipo de perforación, así como separar por lo menos el 85% de los sólidos perforados.

Con frecuencia se hace referencia al sistema de temblorinas como el “primer frente” en el esfuerzo para separar los sólidos perforados. La idea principal es separar los sólidos la primera vez que pasan a través del equipo superficial; esto evita una mayor degradación mecánica de los sólidos por las bombas de lodos, barrena y otros equipos mecánicos.

La selección de mallas y ángulos de cubiertas deben ser ajustados con el propósito principal de separar la mayor cantidad posible de sólidos.

3.2.2.3. Mallas

Para la selección de la malla debe ser considerando el tipo y el área de cubierta que tengan las unidades.

Tipos de mallas.

Las variaciones en los tipos de mallas incluyen:

- Mallas Tensionadas.
- Mallas Pre-Tensionadas.
 - Mallas planas
 - Mallas piramidales



FIG. 3.8. MALLAS TENSIONADAS

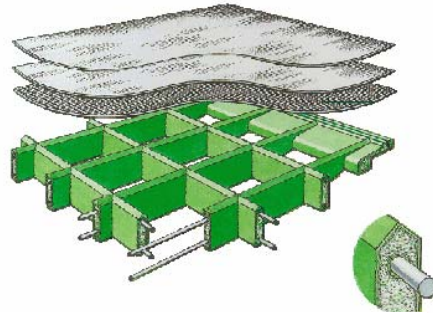


FIG. 3.9a. MALLA PRE-TENSIONADA: PLANA



FIG. 3.9b. MALLA PRE-TENSIONADA: PIRAMIDAL

El nuevo diseño incluye una forma piramidal de la malla para dar un área superficial mas grande para las dimensiones de la malla.

Las mallas tensionadas (Figura 3.8) cuentan con un sistema de tornillos para sostener la malla a la cubierta a la tensión indicada.

Las mallas pre-tensionadas (Figura 3.9a y 3.9b) pueden ser ajustadas con tornillos pero muchas veces utilizan un sistema neumático de ajuste. Este sistema permite hacer cambios de malla más rápido y prevenir el daño de las mallas por la aplicación de una torsión inapropiada.

Parámetros para la selección de las mallas.

Éstos parámetros son el tamaño promedio de apertura, que depende del tipo de tejido y el calibre del alambre, y la capacidad de la malla, la cual depende del tejido y la textura, así como de la forma de la apertura y del refuerzo de la malla.

- **Numero de aperturas (mesh count).**

N= Número de aperturas del cedazo en una pulgada lineal (Figura 3.10).

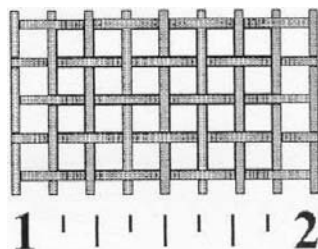


FIGURA 3.10

- **Tamaño de apertura.**

Distancia entre aperturas medida a lo largo de la malla expresada en fracciones de pulgada o micrones.

1 pulgada = 25400 micrones

$$D = 25400 \left[\left(\frac{1}{n} \right) - d \right]$$

donde:

D = Tamaño de apertura (micrones)

n = número de aperturas / pulgada

d = diámetro del alambre (pulgadas)

- **Área abierta de la malla**

Es el área efectiva de la malla por donde se hace el colado (el área adicional es ocupado por los alambres).

Los siguientes son los tamaños de mallas (tipo pre-tensionada), punto de corte y área abierta para mallas estándar "Thule" :

52 mesh - 338 micrones - 48% Área Abierta

84 mesh - 212 micrones - 49% Área Abierta

105 mesh - 162 micrones - 45% Área Abierta

120 mesh - 149 micrones - 50% Área Abierta

145 mesh - 112 micrones - 41% Área Abierta

165 mesh - 104 micrones - 47% Área Abierta

200 mesh - 87 micrones - 46% Área Abierta

230 mesh - 74 micrones - 45% Área Abierta

Características de las mallas.

Optimización de la vida útil. Para que la malla tenga una vida útil debe hacerse un óptimo diseño de acuerdo a las condiciones específicas, así como no sobrecargar las mallas, que haya una limpieza regular de las mismas y repararlas tan pronto se detecte algún daño, entre otros.

Razones de falla prematura. Las principales razones por las que existen fallas prematuras en las mallas es por la obturación y taponamiento, la sobrecarga, una incorrecta selección del tamaño, por un daño mecánico y a que existe una deficiencia en el transporte de los sólidos abrasivos.

Factores que afectan la capacidad de la malla.

- Diseño de la malla. Depende del tipo de tejido y tamaño de cedazo, área disponible, número de capas, propiedades estructurales como la rigidez, perfil, etc.
- Propiedades del fluido. Tales como viscosidad, aditivos y contaminantes.
- Configuración de las mallas. Estos son el ángulo de inclinación de las cubiertas, el movimiento y la distribución de flujo.

Conductancia. Es la medida de la permeabilidad de la malla y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$C = \frac{\mu \times Q}{\Delta P \times A}$$

C = conductancia [kD/mm] ó [milidarcys / mm]

Cada capa de la malla es calculada separadamente. La conductancia total es calculada:

$$C_t = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_n}}$$

Área neta disponible. Es el área de la malla que permite el paso de fluidos. Se utiliza para calcular la transmitancia de la malla.

Transmitancia. Es el producto del área neta disponible y de la conductancia. Esta es muy importante para comparar mallas de diferentes tipos.

$$\text{Transmitancia} = \text{Área Neta Disponible} \times \text{Conductancia}$$

3.2.3. Trampa de arena.

La trampa de arena (Figura 3.11), debajo de las temblorinas primarias, debe vaciarse de sólidos periódicamente, especialmente cuando se utilice fluido base agua. No se recomienda descargar la trampa de arena con el lodo base aceite debido a que se pierde líquido demasiado valioso.



FIGURA 3.11

Las trampas de arena juegan un papel importante en virtud de que protegen los equipos de control de sólidos, contra la erosión de mallas de temblorina al separar aquellas partículas grandes que pudieran obstruir a los hidrociclones o en su defecto, reducir la efectividad del equipo.

El lodo proveniente de la trampa de arena debe rebosar sobre la parte superior del compartimiento de la trampa de arena hacia el siguiente compartimiento donde el desarenador succiona.

Consideraciones prácticas para el uso de la trampa de arena.

- La arena con lodo cae en la trampa de arena desde las temblorinas.
- La arena se precipita hasta el fondo por gravedad.

- La arena se acumula en el fondo y cae hacia la válvula de descarga debido al fondo inclinado.
- El lodo más limpio rebosa al siguiente compartimiento
- Se elimina periódicamente la arena acumulada cuando se llena la trampa.

3.2.4. Desgasificadores.

La presencia de gas en el lodo puede ser dañino (corrosivo) para los equipos de perforación, así como un problema potencial en el control de pozo, además de que es letal si es tóxico o inflamable. Por tal razón, es importante el uso de los desgasificadores.

Hay dos tipos de desgasificadores:

- Desgasificadores atmosféricos (Figura 3.12): Aceptable en lodos de baja densidad y baja viscosidad.
- Desgasificadores de aspiración o de vacío (Figura 3.13): Son superiores a los atmosféricos y muy usados para lodos pesados y alta viscosidad.

Las bombas centrífugas, los hidrociclones y otras bombas del equipo pierden eficiencia si el lodo tiene gas.



FIG. 3.12. DESGASIFICADOR ATMOSFÉRICO

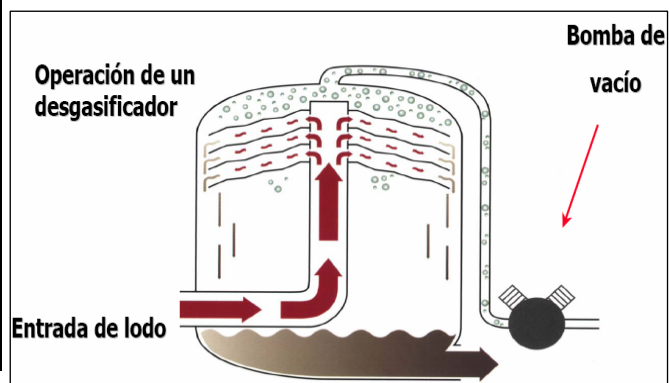
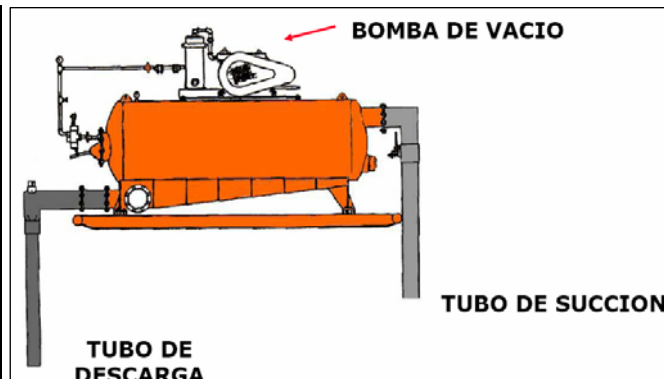


FIG. 3.13. DESGASIFICADORES DE VACÍO

Consideraciones.

Los desgasificadores deben estar ubicados corrientes abajo de las temblorinas y corriente arriba de cualquier equipo que requiera bomba centrífuga.

El succionador debe estar ubicado corriente abajo del trampa de arena y su entrada cercano al fondo (1 pie) del compartimiento.

Los desgasificadores atmosféricos deben ser alimentados horizontalmente a través de la superficie del tanque para que permita el rompimientos de las burbujas de gas.

Los tipo Vacío deben descargar debajo de la superficie del lodo.

3.2.5. Hidrociclones.

Los hidrociclones son recipientes en forma cónica, en los cuales la energía (presión) se transforma en fuerza centrífuga.

La fuerza centrífuga creada por este movimiento del lodo en el cono, forza a las partículas más pesadas contra la pared del cono y se descargan por el fondo, las partículas más livianas son succionadas hacia la parte superior del cono por el efecto de vacío.

Funcionamiento del hidrociclón.

- El lodo se alimenta por una bomba centrífuga, a través de una entrada que lo envía tangencialmente en la cámara de alimentación.
- Una tubería corta llamada tubería del vórtice, forza a la corriente en forma de remolino a dirigirse hacia abajo en dirección del vértice (parte delgada del cono).
- La fuerza centrífuga creada por este movimiento del lodo en el cono, forzan a las partículas mas pesadas contra la pared del cono (Figura 3.14a).
- Las partículas mas livianas se dirigen hacia adentro y arriba como un vórtice en forma de espiral que las lleva hacia el orificio de la descarga o del efluente.
- La descarga en el extremo inferior es en forma de spray con una ligera succión en el centro.

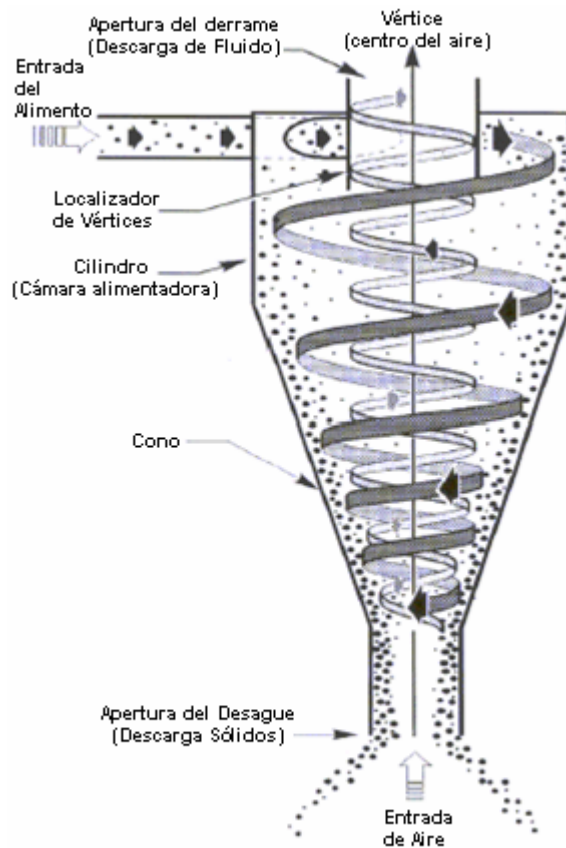


FIGURA 3.14a

- Si la concentración de sólidos es alta, tal vez no haya espacio suficiente para la salida de todos los sólidos. Esto causa una condición de descarga como de chorro.
- En el flujo de chorro, los sólidos se agrupan cerca de la salida y solamente las partículas mas grandes saldrán del cono hasta tapan el cono (Figura 3.14b).
- Antes del taponamiento la velocidad de salida será lenta y los muchos sólidos que no pueden salir del cono regresaran con el fluido.

Teoría del Hidrociclón.

Todos los hidrociclones utilizan la ley de Stokes para alcanzar la separación de sólidos del lodo.

$$V_{sep} = \frac{K \times G \times D_p^2 (\rho_s - \rho_L)}{\mu_L}$$

Donde:

- V_{sep} = Velocidad de separación
- K = Constante de Stokes
- G = Fuerza de aceleración
- D_p = Diámetro de la partícula
- ρ_s = Densidad de sólidos
- ρ_L = Densidad del líquido
- μ_L = Viscosidad del líquido

Eficiencia de separación

La eficiencia de separación del hidrociclón depende de cuatro factores:

1. Parámetros de diseño del hidrociclón (Diámetro/Longitud/entrada/Vértice)
2. Parámetros de flujo (Cabeza de Alimentación).
3. Propiedades del fluido (Viscosidad).
4. Propiedades de las partículas (Densidad).

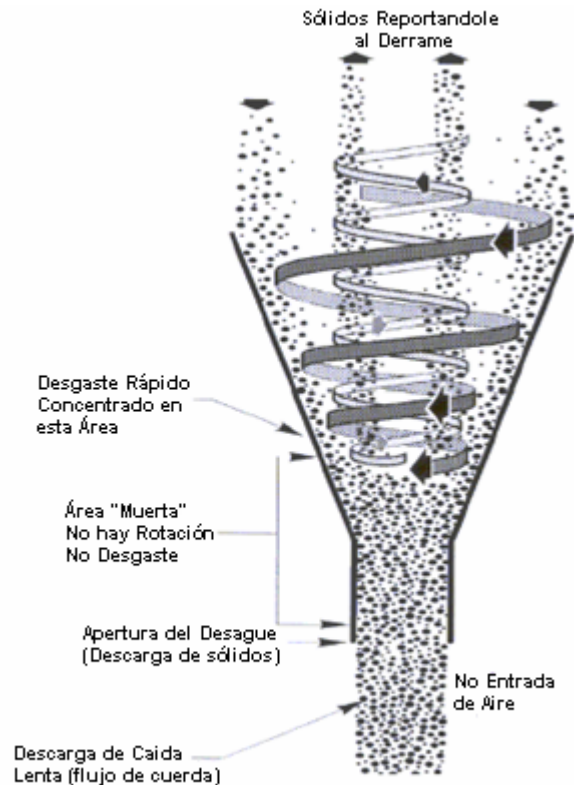


FIGURA 3.14b

Las características de las partículas juegan un papel importante en la eficiencia de la separación. Estas incluyen el tamaño y forma de las partículas, la densidad de las partículas y la concentración de sólidos.

La forma de las partículas influye en el comportamiento de asentamiento. Las partículas de forma rectangular, debido a su altos coeficientes de fricción, se asentarán mas despacio que partículas cilíndricas.

Los hidrociclones están clasificados por su tamaño como desarenadores o desarcilladores.

3.2.5.1. Desarenadores y desarcilladores.

Desarenadores

La función principal del desarenador es eliminar sólidos que a los equipos siguientes le puedan causar taponamientos o mal desempeño (desarcillador, centrifugas), es por ello que su capacidad de procesamiento (tamaño y número de conos) debe ser 30 a 50 % mas que la circulación usada.

Los desarenadores son usados en lodos de baja densidad para separar partículas tamaño arena de 74 micrones o mas grandes. No se recomienda usar en este equipo, lodos de alta densidad, debido a que la barita es sustancialmente más alta que la de los sólidos perforados.

El desarrollo y optimo uso de las temblorinas (con mallas finas) han eliminado el uso de este equipo, sin embargo, este se usa en casos (diámetros grandes y altas velocidades de perforación) en que las temblorinas no pueden separar hasta 100 micrones (uso de mallas 140).

Los desarenadores deben ser instalados después del desgasificador y antes del desarcillador (Figura 3.15). El lodo de alimentación se debe tomar del tanque donde descargue el desgasificador y su descarga debe ser en el tanque contiguo a succión.

Se debe asegurar que el nivel entre los tanques del desarenador sea homogéneo, por ello es recomendable contar con una válvula que comunique ambos tanques.

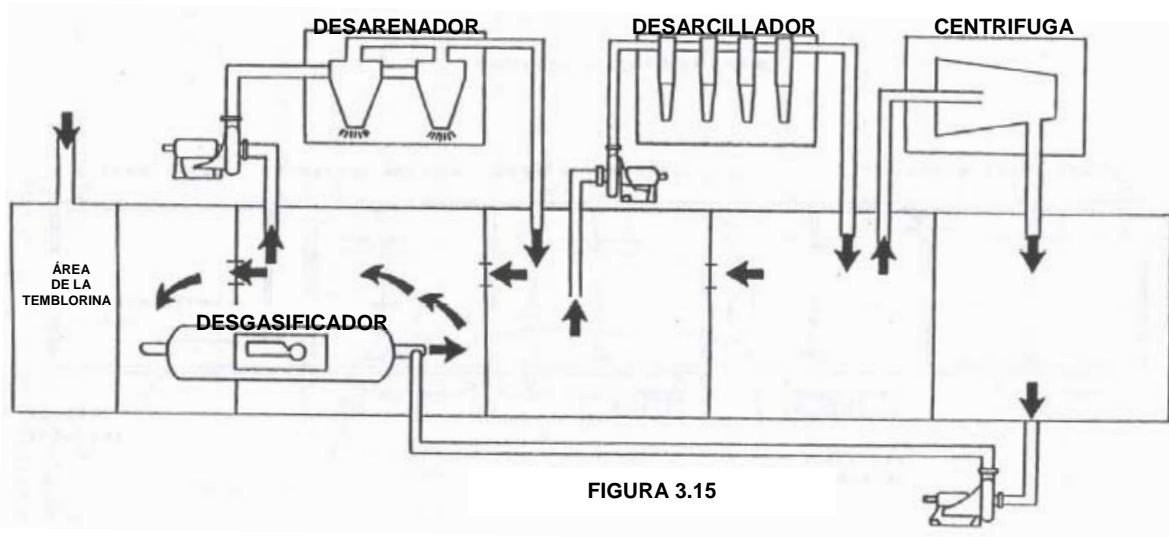
Desarcilladores.

El desarcillador difiere del desarenador en el tamaño de los conos y punto de corte pero su funcionamiento es igual. Son usados para separar sólidos perforados en un rango de 12 a 40 micrones.

Gran cantidad del tamaño de partícula de la barita se encuentra en el rango de "limo", es por esta razón, que en lodos densificados no es muy recomendable el uso de los desarcilladores. Estos se utilizaran con lodos densificados cuando su

descarga corriente abajo pueda ser procesada por las centrifugas o por una temblorina.

El lodo debe ser succionado del tanque que descarga el desarenador y su descarga procesada en el tanque contiguo (Figura 3.15).



Se debe asegurar que el nivel entre los tanques del desarcillador sea homogéneo, por ello es recomendable contar con una válvula que comuniqué ambos tanques. Esta organización de succiones y descargas en serie, permite que cada equipo trabaje en un rango particular de tamaño de sólidos.

Ventajas y desventajas de los hidrociclones.

Ventajas.

- Operación simple de fácil mantenimiento.
- Barato.
- No tienen partes móviles.
- Su operación permite reducir costos, pues es reducido el desecho de lodo.
- Incrementan la vida de la barrena y aumentan las velocidades de penetración.

Desventajas.

- Las propiedades del lodo afectan su desempeño.
- Su operación genera degradación de los sólidos.
- Uso de bomba centrifuga.
- Voluminoso.
- Los puntos de corte generados se pueden obtener con optimas temblorinas.

- La descarga de sólidos es bastante húmeda.
- Requieren correctos tamaño de bomba.
- Sus conos fácilmente se tapan.
- El mal funcionamiento de sus conos generan excesivas pérdidas de lodo.

3.2.6. Limpiador de lodos.

El limpiador de lodo es básicamente una combinación de hidrociclones (desarenadores, desarcilladores) colocados encima de un tamiz de malla fina y alta vibración de temblorina (Figura 3.16).

La principal función de un limpiador de lodos es recuperar la barita y desarenar un lodo densificado, así como tamizar la descarga corriente abajo de los hidrociclones para recuperar la fase líquida, recuperar la barita descartada y separar partículas de tamaño intermedio, permitiendo que las centrífugas decantadoras operen en forma eficiente, proporcionando un corte general mas fino. Además se aplica en lodos donde la fase líquida es cara o ambientalmente no es muy recuperable.

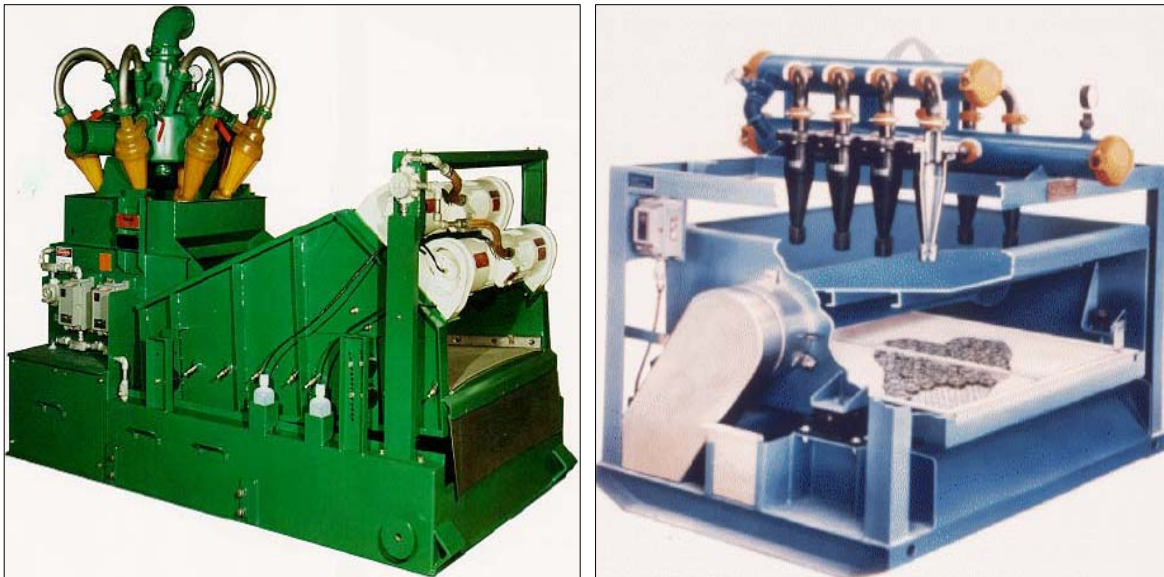


FIGURA 3.16. LIMPIADOR DE LODOS

La descarga limpia de los conos y el fluido tamizado por las mallas es retornado al sistema activo.

Los parámetros que pueden ser ajustados durante la operación normal de un limpiador de lodos son los siguientes:

- Cantidad de conos.
- Tamaño / tipo de cono
- Tamaño de la malla
- Velocidad de vibración.

El número y tamaño de conos requeridos para cada equipo depende de los volúmenes de circulación esperados, se recomienda instalar suficientes conos para procesar entre 110 y 120% del volumen de circulación máximo.

Ventajas.

- Recupera la fase líquida costosa (ej. diesel) y algo de la barita descartada por los hidrociclones.
- Produce relativamente cortes más secos.
- Fácil de operar.
- Es una unidad compacta.

Desventajas.

- Recicla sólidos finos a través de sus mallas.
- Descarga barita con los cortes.
- Capacidad limitada.
- La separación en parte depende de los conos que tienen, normalmente, un pobre desempeño.
- Requiere para su operación de una bomba centrífuga.

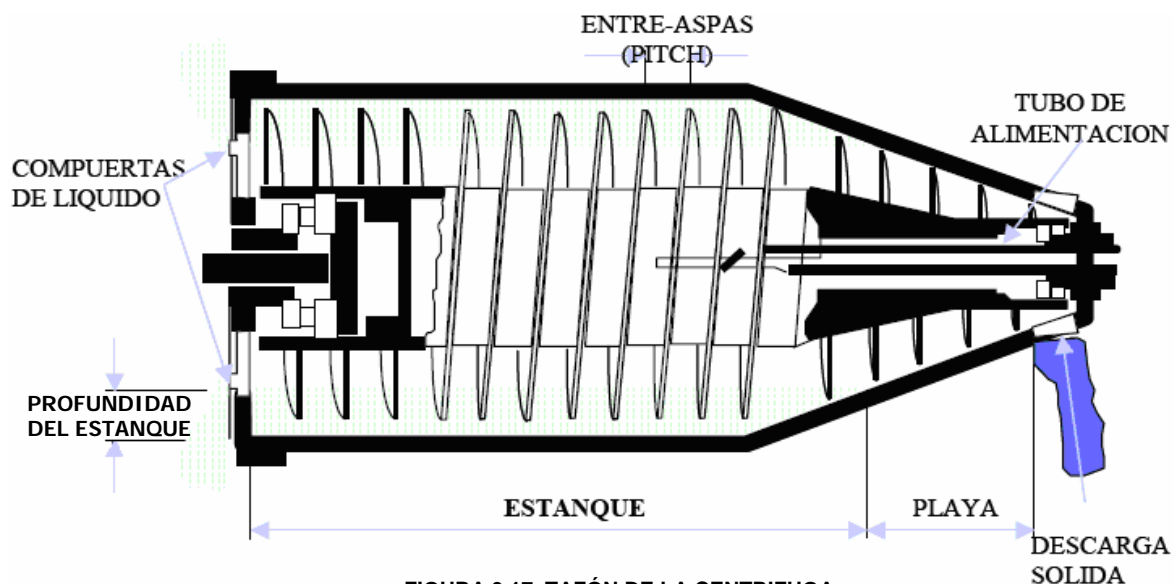
Consideraciones prácticas para el uso del limpiador de lodos.

- El equipo combina temblorinas, desarcillador y desarenador.
- Reduce el contenido de humedad de la descarga de los hidrociclones.
- Se pueden usar mallas hasta 325 mesh.

3.2.7. Centrífugas decantadoras.

Las centrífugas juegan un papel importante en la eficiencia del control total de sólidos al separar sólidos de perforación en un rango muy fino, llegando hasta cerca de dos micrones en tamaño.

Este equipo (Figura 3.17) permite la separación de los sólidos finos que han logrado pasar a través de las temblorinas y los hidrociclones. Está compuesto por un tazón cónico horizontal de acero que gira a alta velocidad, usando un transportador tipo doble tornillo sinfín (Figura 3.18).



Principales componentes.

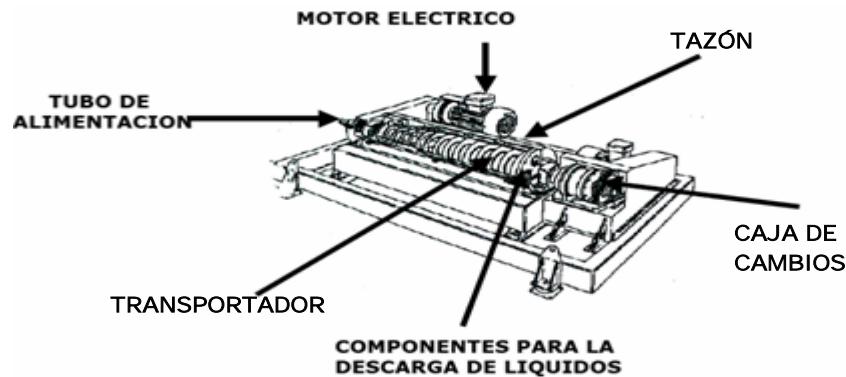


FIGURA 3.18 CENTRIFUGA DECANTADORA

Principio de operación.

- Los sólidos son separados por grandes fuerzas centrífugas, las cuales son generadas por la rotación del tazón.
- El fluido libre de sólidos es descargado desde el deposito en el otro extremo del tazón.
- El transportador gira en el mismo sentido que el tazón externo, pero a una velocidad menor creando una velocidad diferencial que permiten la acumulación de los sólidos hacia las paredes del tazón y su descarga por los extremos del mismo.

Un aspecto importante del funcionamiento de la centrífuga es la dilución del lodo que es alimentado, el cual reduce la viscosidad del fluido alimentado, manteniendo una alta eficiencia en la separación de los sólidos.

Separación centrífuga.

Esta separación se basa en el principio de la aceleración centrífuga para aumentar la fuerza de gravedad o fuerza "G".

Cuando un objeto se hace girar alrededor de un eje, la gravedad aumenta de un "G" en el eje de rotación a cierta fuerza G máxima de la periferia del objeto.

$$\text{FUERZA "G"} = D \times \text{rpm}^2 \times 0.0000142$$

donde:

D = diámetro del tazón (pulg)

rpm = velocidad del tazón

Desempeño de las centrífugas.

Los siguientes son los parámetros que determinan el desempeño de las centrífugas:

- La fuerza G, la cual depende de el diámetro y la velocidad del tazón.
- La viscosidad del fluido.
- La velocidad de procesamiento.
- La profundidad del deposito.

- La velocidad diferencial entre el tazón y el transportador.
- La posición del tubo de alimentación de la centrífuga.

Recomendaciones de operación para las centrífugas decantadoras.

Es recomendable operar las centrífugas en serie en los siguientes sistemas:

- Emulsiones inversas.
- Sistemas de alta densidad base agua.
- Sistema base agua en que el fluido base es costoso (salmueras y formiatos).
- Circuitos cerrados (cero descargas).

3.2.7.2. Centrífugas de baja velocidad

- Recupera barita, eliminando la fase líquida en lodos densificados.
- Elimina los sólidos perforados.
- Contribuye al control de la viscosidad plástica del lodo.

3.2.7.3. Centrífugas de alta velocidad.

- Recupera el líquido del efluente de la centrífuga de baja velocidad, permitiendo recuperar base de fluidos costosos.
- Para lodos no densificados, elimina y controla los sólidos perforados.
- Contribuye al control de la viscosidad plástica del lodo.

La primera unidad centrífuga se usa para separar la barita y retornarla al sistema de lodos, en tanto que la segunda unidad, procesa el flujo de líquido en exceso de la primera unidad, eliminando todos los sólidos y regresando la porción líquida al sistema de lodos.

Se recomienda tener una capacidad para procesar del 5 al 15% de la velocidad de circulación máxima del equipo de perforación.

3.2.7.4. Bombas centrífugas.

Los dos principales componentes de una bomba centrífuga (Figura 3.19) son la rueda impulsora (impeler) y la carcasa.

El impeler produce una velocidad en el líquido y la voluta fuerza al líquido para descargarse de la bomba convirtiendo la velocidad a presión.

Después de ser encendidas, las bombas centrífugas seguirán bombeando un volumen creciente hasta que se logre la carga máxima (pies) a través de la aspiración y fricción, si no la bomba comenzara a cavitarse.

La cavitación ocurre cuando esta saliendo mas fluido del que esta entrando.

Las bombas centrífugas deben ser del tamaño adecuado para la aplicación

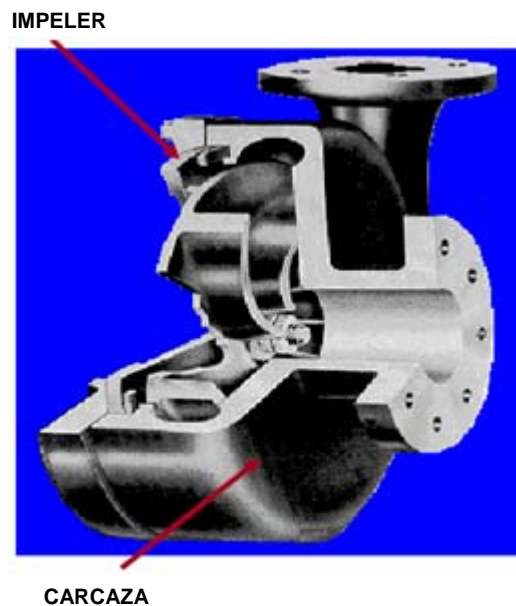


FIGURA 3.19 BOMBA CENTRÍFUGA

especifica en que serán usadas, si no, la energía producida será incorrecta, causando resultados indeseables.

Cavitación por succión.

La cavitación por succión (Figura 3.20) ocurre cuando la succión de la bomba esta a baja presión o alto vacío, donde el líquido pasa a vapor en la punta u ojo del impeler de la bomba. Este vapor es llevado sobre la parte de la descarga de la bomba, donde no es mas grande que el vacío y es nuevamente comprimido a líquido por la alta presión de descarga. Esta acción de implosión ocurre violentamente y ataca la cara del impeler.

Un impeler que ha sido operado bajo la condición de cavitación por succión tiene grandes trozos de material removido de su cara causando falla prematura de la bomba.

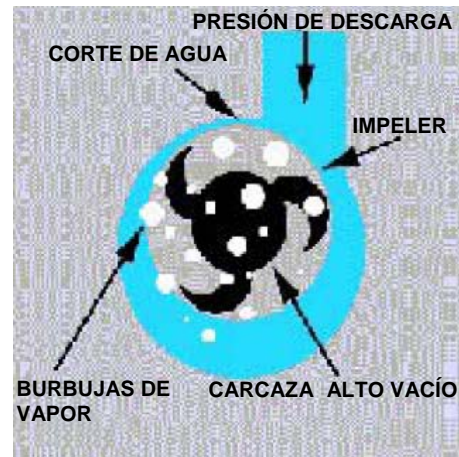


FIG. 3.20 CAVITACIÓN POR SUCCIÓN

Cavitación por descarga.

La cavitación por descarga (Figura 3.21) ocurre cuando la descarga de la bomba es extremadamente alta.

La alta presión de descarga causa que la mayoría del fluido circule dentro de la bomba, en vez de ser descargado. A medida que el líquido fluye alrededor del impeler, éste pasa a través de la pequeña tolerancia entre el impeler y el corte de agua de la bomba, a una velocidad extremadamente alta.

Ésta velocidad causa un vacío, que se desarrolla en el corte de agua y el líquido se convierte en vapor.

Una bomba que ha sido operada bajo estas condiciones presenta un desgaste prematuro en las aspas del impeler y en el corte de agua de la bomba.

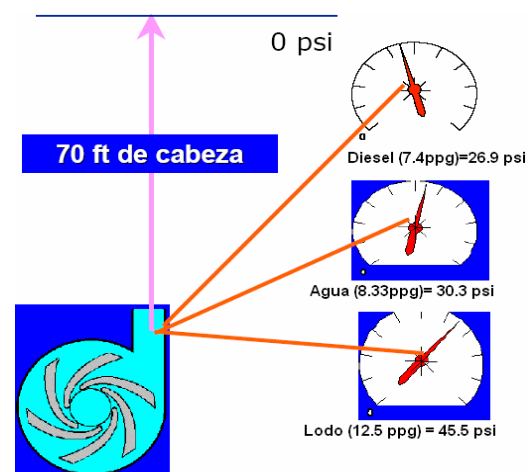


FIG. 3.21 CAVITACIÓN POR DESCARGA

Relación entre presión y altura de un líquido.

La carga (altura) se mide en pies y según la densidad del fluido, se convierte en la presión máxima (psi) en la descarga de la bomba.

Luego la presión disminuirá continuamente hasta "0" psi, según la aspiración y la fricción, hasta que el fluido salga del sistema.



$$P = 0.052 \times \text{Densidad (lb/gal)} \times \text{Carga (pies)}$$

Donde:

Carga = Altura de la columna del fluido [pies]

0.052 = Factor de conversión

P = Presión [psi]

Importancia de la carga.

Todas las aplicaciones para bombas centrífugas requieren una carga mínima para funcionar correctamente.

La carga mínima requerida, es la carga requerida para hacer subir el fluido verticalmente hasta la aplicación, tomando en cuenta la resistencia de la carga de fricción al flujo dentro de la tubería.

Carga de aspiración

La carga de aspiración es la energía que la bomba debe usar para entregar el lodo verticalmente hasta la entrada de la aplicación. La distancia vertical se mide a partir del eje de aspiración de la bomba.

Carga de fricción

Es la carga producida por la resistencia al flujo. La carga de fricción aumenta cuando el gasto de la bomba (GPM) aumenta. Los diámetros más pequeños de la tubería, los tendidos más largos de la tubería y la mayor cantidad de conexiones, son factores que aumentan la carga de fricción.

Carga de aspiración neta.

Debe haber una carga suficiente en el lado de aspiración de la bomba, para forzar al fluido a entrar en la misma, al mismo ritmo que el fluido trata de salir por el lado de la descarga. Si esta carga no es suficiente habrá cavitación.

Hay dos tipos de Carga de Aspiración Neta Positiva (CANP):

CANP Requerida (CANP_R). Es un factor limitador para el gasto volumétrico, que es indicado directamente por las curvas de rendimiento de una bomba. Cuando el gasto de la bomba aumenta, se requiere mas CANP.

CANP Disponible (CANP_D). Se determina mediante la presión atmosférica, temperatura del lodo, la altura del lodo encima del eje de la bomba y la carga de fricción de la tubería de aspiración.

$$\text{CANP}_D = H_a + H_e - H_f - H_{vp}$$

Donde:

H_a = Carga atmosférica [pies]

H_e = Carga de altura (Bombeo a superficie del lodo) [pies]

H_f = Carga de fricción (Perdida por fricción en la aspiración) [pies]

H_{vp} = Presión de vapor del lodo a la temperatura de bombeo [pies]

La CANP se calcula mediante la siguiente ecuación y ésta debe ser positiva:

$$\text{CANP} = \text{CANP}_D - \text{CANP}_R$$

Curva de rendimiento.

La curva de rendimiento de una bomba centrífuga es producida por el fabricante de acuerdo a pruebas que se les realiza, y muestran la relación entre el gasto, la eficiencia, la CANP_R y potencia requerida.

- A más cabeza menos gasto.
- A más baja cabeza más gasto.
- A más bajo gasto menos potencia.
- A más alto gasto más potencia.

Leyes de afinidad.

El rendimiento de una bomba centrífuga es afectada por el cambio en la velocidad (rpm) o diámetro del impeler.

La ley de afinidad para una bomba centrífuga donde el diámetro del impeler permanece constante y la velocidad cambia:

$$\text{Gasto: } \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{Cabeza: } \frac{H_1}{H_2} = \frac{V_1^2}{V_2^2} \quad \text{Potencia: } \frac{BHP_1}{BHP_2} = \frac{V_1^3}{V_2^3}$$

La ley de afinidad para una bomba centrífuga donde la velocidad es constante y el diámetro del impeler cambia:

$$\text{Gasto: } \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1}{D_2} \quad \text{Cabeza: } \frac{H_1}{H_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad \text{Potencia: } \frac{BHP_1}{BHP_2} = \frac{D_1^3}{D_2^3}$$

Donde:

- Q = Gasto en gpm
- D = Diámetro del impeler en pulgadas
- H = Cabeza en pies
- BHP = Caballos de fuerza (potencia)
- V = Velocidad en rpm

3.2.8. Tanques de lodo.

3.2.8.1. Área de tanques.

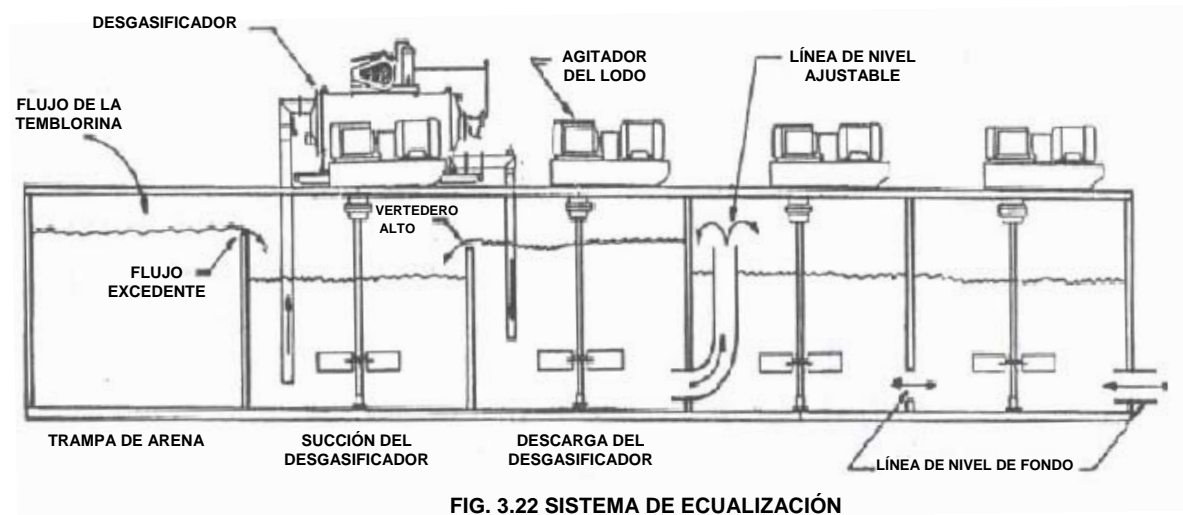
El área de tanques debe:

- No ser ni muy grande ni muy pequeño.
- No ser ni somero ni muy profundo.
- No ser ni tan angosto ni tan amplio.
- Tener buena agitación.

Mínima Área de Superficie (MADS). La mínima área de superficie en los tanques se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$MADS [ft^2] = \frac{\text{Máximo flujo a manejar [gpm]}}{40}$$

3.2.8.2. Sistema de equalización.



Líneas de nivel.

Las líneas de nivel son requeridas entre los compartimientos y cada uno de los tanques del sistema activo para permitir el constante flujo de los fluidos, manteniendo constante el nivel de los líquidos entre los tanques o compartimiento y eliminando la posibilidad de niveles bajos en la succión que puedan causar cavitación en las bombas centrifugas.

Estas líneas son recomendadas entre el tanque de mezcla y el de succión, entre otros tanques deben de utilizarse líneas de nivel de fondo.

El diámetro de las líneas debe ser de mínimo 10 pulgadas, con el fin de evitar taponamientos y condiciones turbulentas de flujo.

Para determinar el diámetro de éstas líneas se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Diámetro}[\text{pulg}] = \sqrt{\frac{\text{Gasto Máximo} [\text{gpm}]}{15}}$$

3.2.8.3. Sistemas de agitaci3n.

El sistema de agitaci3n, es muy importantes, ya que permite una uniforme suspensi3n de los s3lidos y disminuye el asentamiento de éstos en las esquinas de los tanques.

Son necesarios en todos los tanques, a excepci3n de la trampa de arena.

El tamaño y tipo de agitador, esta definido por el diseño de los tanques.

Tipos de agitadores.

Agitadores de paleta.

- Patr3n de flujo axial. Éste debe de tener una distancia al fondo del tanque, del resultado de multiplicar 1/3 a 3/4 por el diámetro de la paleta, y las cuchillas deben de tener una determinada inclinaci3n (Figura 3.23).

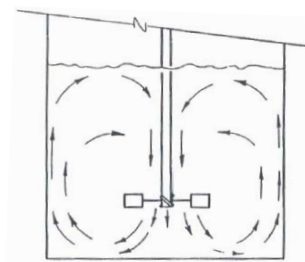


FIGURA 3.23

- Patr3n de flujo radial. Este agitador, a diferencia del anterior, tendrá una distancia al fondo del tanque, lo mas cerca posible y las cuchillas no tendrán inclinaci3n, sino que formaran planos perpendiculares al fondo del tanque (Figura 3.24).

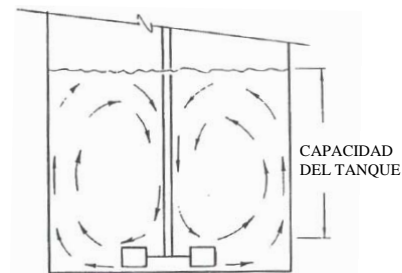


FIGURA 3.24

Mezcladores de chorro.

- Eductor radial. Son mezcladores de chorro de alto volumen, que producen alta turbulencia y logran suspender los sólidos en el fluido (Figura 3.25).

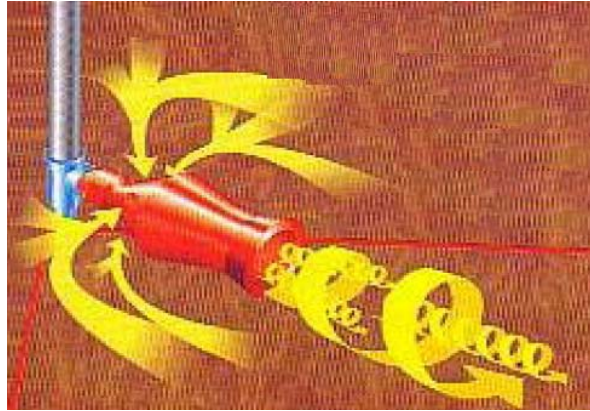


FIGURA 3.25

Parámetros para el diseño de los agitadores.

Los parámetros a considerar son:

- El volumen del tanque.
- Los diámetros de las aletas.
- La densidad máxima del lodo.
- El tipo de flujo de acuerdo a las aletas.
- La distancia desde el fondo del tanque.
- La velocidad de rotación.

CAPÍTULO 4

LIMPIEZA DEL POZO

4. Limpieza del pozo.^{6,7}

4.1. Introducción.

La eliminación de recortes del agujero del pozo es una parte esencial de la perforación. La eficiencia en la limpieza del agujero, se debe de mantener en todos los pozos. El fracaso en la efectividad del transporte de recortes puede resultar en un número de problemas de perforación tales como:

- Jalón de tubería muy rápidos en los viajes.
- Alto arrastre y torsión.
- Pegadura de tubería.
- Agujero empacado.
- Presión de ruptura de la formación
- Baja velocidad de penetración
- Perdida de circulación
- Problemas al correr la tubería de revestimiento.
- Fallas en la cementación primaria.
- Excesiva densidad equivalente de circulación
- Acumulación de recortes.

Todos estos son problemas potenciales tanto para los pozos casi verticales (menor a 30° de desviación) y los pozos desviados. Sin embargo, por lo general, los pozos verticales raramente presentan problemas en la limpieza del pozo. Los problemas anteriormente mencionados son comunes en pozos altamente desviados.

El éxito de la limpieza del pozo depende de la integración óptima de las propiedades del lodo junto con la mejor práctica en la perforación. Cuando se encuentran dificultades es esencial entender la naturaleza y las causas del problema. Esto permite tener opciones enfocadas para determinar las acciones mas apropiadas.

4.2. Factores generales que afectan la limpieza del pozo.

Hay un gran número de variables en la perforación, que influyen en el proceso de la limpieza del pozo. El perforador tiene un control directo sobre algunas variables, otros son predeterminados por las restricciones en las operaciones de perforación.

- **Transporte de recortes.**

La figura 4.1 representa los mecanismos del transporte de recortes para un rango de pozos inclinados.

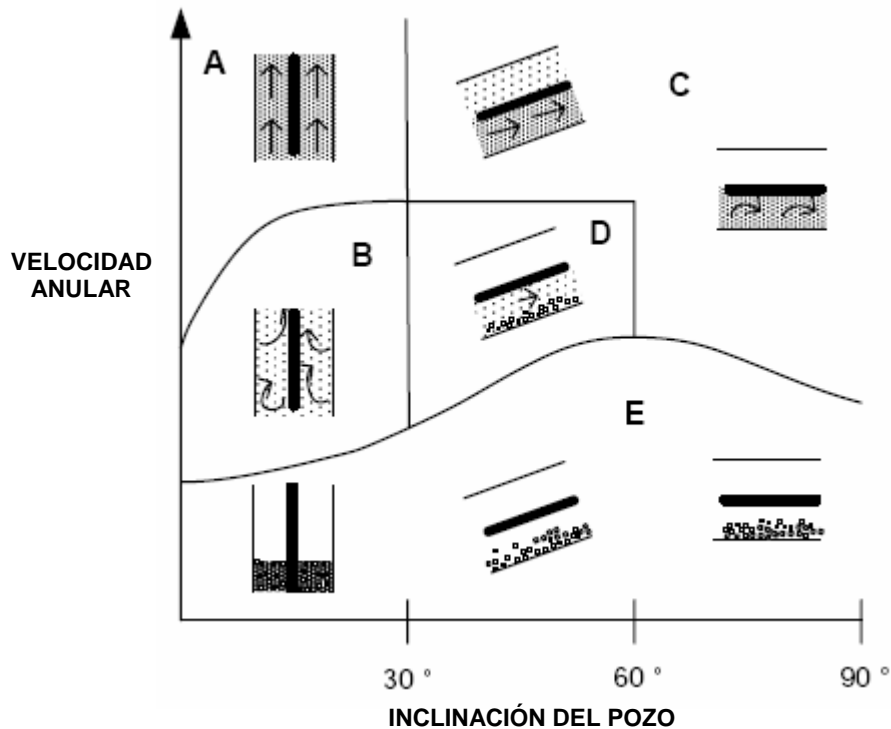


FIGURA 4.1 ZONAS DE LA LIMPIEZA DEL POZO

- Zona A.** Eficiente limpieza del pozo.
- Zona B.** Baja eliminación de recortes.
- Zona C.** Buena limpieza del pozo con movimientos de cama de recortes.
- Zona D.** Poca limpieza del pozo. Formación de cama de recortes.
- Zona E.** No hay limpieza del pozo.

En pozos inclinados menor a 30°, los recortes son suspendidos eficazmente debido al esfuerzo cortante y a que no forma camas de recortes (zona A y C). Para tales casos se aplican los cálculos de transporte convencional de velocidad de asentamiento.

Más allá de los 30 grados, los recortes forman camas en la parte baja del pozo, los cuales, se puede deslizar hacia el fondo del pozo causando que el espacio anular se empaque, además éstos pueden moverse en masas como una cama deslizable (zona D) o si no, pueden ser transportados en la interfase fluido de perforación-cama de recortes, como ondas o dunas (zona B).

Los patrones de flujo en el espacio anular dependen en gran medida del gasto de la bomba y la reología del lodo.

Los fluidos de baja viscosidad con bajo punto de cedencia suele causar turbulencia y agitación de recortes. Los fluidos de baja viscosidad con alto

punto de cedencia, aumenta la fuerza de arrastre del fluido y hace que la cama de recortes se deslice.

Las zonas ideales para el transporte de recortes son las zonas A y C. La zona E garantiza problemas de agujero cerrado.

- **Reología**

El efecto de la reología del lodo en la limpieza del pozo depende del régimen de flujo en el espacio anular. Al incrementar la viscosidad del lodo en el régimen laminar, mejorará la limpieza del agujero y es particularmente efectivo si el esfuerzo cortante es mínimo y la relación de punto de cedencia/viscosidad plástica son altas.

Al reducir la viscosidad del lodo en el régimen turbulento, ayudará a remover los recortes.

- **Punto de cedencia a baja velocidad de corte(LSRYP).**

Esta es una medida de las propiedades de corte del lodo. Este se determina de lecturas de 6 rpm a 3 rpm de un viscosímetro Fann convencional, con:

$$\text{LSRYP} = [(2 \times \text{lectura Fann a 3 rpm}) - \text{lectura Fann a 6rpm}]$$

Esta propiedad controla el tamaño del recorte que se puede suspender en el lodo que va fluyendo (suspensión dinámica). La suspensión dinámica se afectará debido a el tamaño de los recortes y la densidad del lodo. En la práctica, el nivel óptimo requerido se establece mejor con base en datos de campo y experiencia.

Nota: Un buen inicio para el LSRYP es un valor mayor a 5, u otra regla es mantener el valor de la lectura Fann de 6 rpm más grande que el diámetro del agujero, donde la medida de éste es en pulgadas.

- **Velocidad de la bomba.**

La velocidad del flujo del lodo proporciona la fuerza de elevación de los recortes para llevarlos fuera del pozo. En pozos muy desviados la velocidad del flujo del lodo, es el factor mas importante para la limpieza del agujero. Para pozos verticales, la velocidad de eliminación de los recortes aumenta con el incremento de la velocidad en el espacio anular y/o el aumento de la reología.

Nota: Una velocidad en el espacio anular mayor o igual a 150 pies/minuto es un razonable punto de partida, pero mas que eso, sería mucho mejor.

- **Geometría del agujero.**

El diámetro del agujero tiene un efecto muy importante en el espacio anular. Por ejemplo, al reducir el diámetro de 17 ½ pulgadas a 16 pulgadas, aumentará la velocidad en el espacio anular en aproximadamente un 20%.

- **Densidad del lodo.**

La densidad del lodo influye en la limpieza del agujero mediante el efecto de flotación de los recortes perforados. Como la densidad del lodo aumenta, los

recortes tenderán a flotar hacia fuera del pozo haciendo la limpieza del pozo mas fácil. En la práctica, la ventana operacional de la densidad del lodo será limitada por factores de perforación (la limpieza del agujero, estabilidad del pozo, densidad equivalente de circulación DEC, problema de pegadura diferencial, etc).

- **Propiedades de los recortes.**

La limpieza del agujero depende tanto de la densidad como del tamaño de los recortes. Al aumentar la densidad y el tamaño de éstos, tiende a aumentar su velocidad de deslizamiento. Esto hace el transporte más difícil.

Los efectos de velocidad de deslizamiento más altos, pueden combatirse mediante un apropiado aumento en el LSRYP y en la fuerza gel del lodo.

En circunstancias extremas, se puede hacer la selección de una barrena que genere recortes más pequeños y, por lo tanto, reducir la velocidad de deslizamiento.

- **Velocidad de penetración.**

Aumentos en la velocidad de penetración da como resultado una concentración de recortes más alta en el espacio anular. Esto llevará a una densidad de lodo mas alta en el espacio anular y a presiones más alta de circulación que pueden, alternadamente, limitar las velocidades del flujo.

- **Rotación de la tubería de perforación.**

En pozos desviados, las altas velocidades de rotación de tubería, proporcionan medios eficaces de perturbación mecánica sobre las camas de recortes y los reintroduce al flujo de lodo para eliminarlos.

La rotación de la tubería de perforación tiene un pequeño efecto en la limpieza del agujero y en pozos casi verticales. Sin embargo, se aconseja un periodo de circulación y rotación de tubería después de “perforar deslizando” ya que, durante periodos de perforación en esta condición, el recorte no habrá sido ascendido.

- **Monitoreo del equipo de perforación.**

Hay equipos adicionales que permite indicar si la limpieza del pozo es efectiva o no y estas deberían analizarse por las tendencias de estos indicadores. Por ejemplo:

- La forma y el tamaño de los recortes sobre la temblorina, deberían ser supervisados regularmente, ya que, los pequeños recortes redondeado indica que los mismos han sido gastados por amplios periodos de tiempo en el fondo del pozo, siendo remolido por la barrena.
- La cantidad de recortes en las temblorinas también debería ser medida y comparada con el volumen pronosticado de la velocidad de penetración.
- La torsión y el arrastre se pueden usar para determinar si las camas de recortes son añadidas a la fricción del pozo.

-
- En la actualidad, las principales compañías de lodo han realizado sofisticado y fiables modelos para la limpieza del agujero, predicciones de DEC, etc. y se deberían usar cuando sean necesarios.

4.3. Pozos verticales y casi verticales.

La reología juega un papel muy importante en la transportación de los recortes en pozos verticales y casi verticales.

En particular, en agujeros de diámetro grande, no se pueden limpiar solo por la velocidad. Sin embargo, suponer que el lodo tiene la reología correcta, no es un problema en la limpieza del agujero de esos pozos.

La velocidad del lodo en el espacio anular es generalmente mucho mas grande que la velocidad de deslizamiento de los recortes y de esta manera, los recortes son llevados fuera del agujero. Para asegurar que se logro una baja velocidad de deslizamiento, estos pozos son normalmente perforados con lodos viscosos y altos punto de cedencia.

Reglas generales para la limpieza en pozos casi verticales.

- **Seleccionar las propiedades del lodo para proporcionar una optima limpieza del agujero mientras se perfora.** Las propiedades específicas dependerán de la velocidad de la bomba disponible. En todos los casos, la reología del lodo se debe mantener en un nivel que reduzca la velocidad de deslizamiento para niveles aceptables.
- **La mala limpieza del agujero resultaría en altas acumulaciones de recortes en el espacio anular.** Cuando se detiene la circulación, los recortes pueden confinarse y atrapar a la barrena. Cuando el atrapamiento ocurre, quiere decir que el régimen de flujo es demasiado bajo o el pozo no ha sido circulado por suficiente tiempo (suponiendo que son conocidas las propiedades del lodo).
- **Circular completamente el agujero antes de realizar los “viajes”.** No es suficiente un solo tiempo de atraso. El volumen mínimo recomendado para los pozos verticales es 1.3 x tiempo de atraso (1.5 por agujero > 8 ½”). Supervisar las temblorinas para asegurar que la cantidad de recortes que regresan se reduce a un aceptable nivel de trasfondo previo a comenzar el “viaje”.
- **Uso limitado de baches de alta viscosidad para complementar la limpieza del pozo.** Ajustar muy bien las propiedades del lodo en la circulación para proporcionar una optima capacidad de limpieza. Los baches de alta densidad no se deben usar en pozos verticales.
- **En pozos verticales, hay que reciprocar y rotar la tubería durante la circulación antes de realizar el “viaje”.** Esto ayuda a eliminar los recortes de las zonas estancadas cerca de la pared del pozo.
- **Es apropiado volver a pasar en el agujero cerrado con la condición de que la tubería baje libremente.** Acordar con anticipación un máximo permisible del “jalón” con el superintendente de perforación. No ir

inmediatamente al máximo jalón, pero trabajar progresivamente asegurando que la tubería este libre para bajar en cualquier ocasión.

- **Parar y circular, en la limpieza del agujero, si los jalones llegan a ser excesivos (muy rápidos).**
- **Evitar rotar hacia arriba.** Entender la naturaleza y las causas de algunos problemas encontrados en el “viaje”. Solamente se rota hacia arriba cuando sea necesario.

4.4. Pozos de alto ángulo de desviación.

Mucha de la información dada anteriormente relacionado con la limpieza del agujero en pozos casi verticales, es importante para pozos de alto ángulo de desviación, sin embargo es mucho mas difícil mantener limpio el agujero en pozos desviados.

Las reglas generales dadas a continuación están basadas en las conclusiones derivadas tanto de laboratorio como información de campo.

Reglas generales para la limpieza en pozos desviados.

- **Velocidad del flujo.**

El único factor más importante referente a la limpieza del agujero en pozos desviados es la velocidad del flujo (por ejemplo velocidad anular). Durante las operaciones en la perforación direccional, los recortes perforados se quedarán en la parte baja del agujero y formarán una cama estacionaria si se usa una escasa velocidad anular.

Cuando se planea un pozo es imprescindible que se seleccionen las bombas de lodo de suficiente tamaño y capacidad para lograr esta velocidad requerida.

Normalmente existen pocos problemas de limpieza del agujero en secciones horizontales y verticales. La mayoría de los problemas asociados con la limpieza del agujero se ven en pozos desviados de 50 a 60 grados, donde los efectos de gravedad pueden formar camas de recortes que se hundan en el fondo del pozo.

Velocidades de flujo típicas, propuestas para pozos de alto ángulo de desviación, son las siguientes:

Tamaño del agujero	Velocidades de flujo
17 ½ pulgadas	1,100 gpm como mínimo, algunos equipos logran 1,250 a 1,400 gpm.
12 ¼ pulgadas	1,100 gpm (aunque se logra normalmente de 800 a 1000 gpm).
8 ½ pulgadas	500 gpm. Nota: velocidades de flujo mayores a 550 gpm pueden conducir a una erosión hidráulica en el agujero.

- **Selección del régimen de flujo.**

Cuando se diseña correctamente tanto el régimen de flujo laminar como el turbulento, se limpiará efectivamente un pozo desviado. En general, al aumentar la viscosidad de un fluido en flujo laminar mejorará la limpieza del agujero, así como, una reducción de la viscosidad de un fluido en flujo turbulento (Figura 4.2). Es importante que uno u el otro régimen sea seleccionado y que se evite entre las dos, la zona de transición.

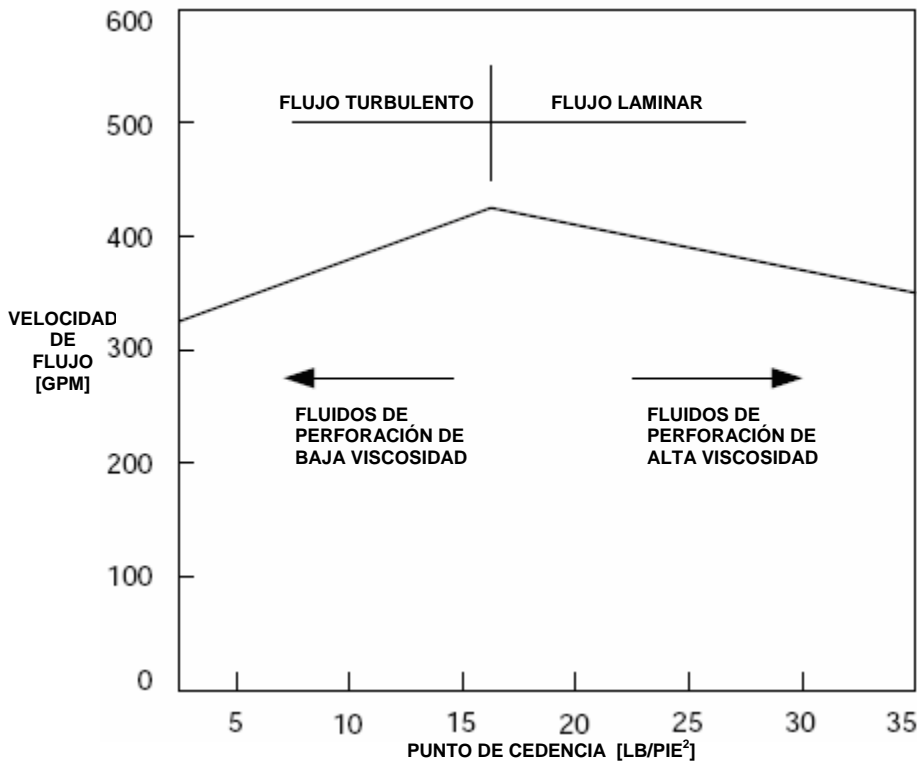


FIGURA 4.2. EFECTO DEL PUNTO DE CEDENCIA EN LA VELOCIDAD DE FLUJO

Generalmente, se prefieren los fluidos viscosos en el flujo laminar porque:

- Es posible lograr la más alta capacidad de limpieza (factor reológico).
- Los fluidos viscosos dan mejor transporte en las secciones casi verticales y tienen mejor características de suspensión cuando la circulación se detiene.
- Difícilmente se logra “flujo turbulento”, excepto en agujeros de tamaño pequeño.

El flujo turbulento efectivo evita la formación de camas de recortes en las partes bajas de pozos altamente desviados y ayuda a minimizar la densidad equivalente de circulación (DEC). Por estas razones, la turbulencia se prefiere en agujeros desviados donde hay una pequeña ventana entre la densidad del lodo y el gradiente de fractura. Sin embargo, es difícil lograr la turbulencia en agujeros de diámetros grandes (12 ¼” y mas grandes) particularmente cuando se usan lodos de alta densidad.

Los regímenes de turbulencia no deben ser usados en formaciones no consolidadas, ya que, los subsecuentes derrumbamientos de roca reduciría las velocidades anulares, a un punto donde el flujo laminar se comportará como un fluido con propiedades específicamente diseñadas para turbulencia. La formación de cama de recortes y el deslizamiento de la barita sería casi inevitable.

Todos los fluidos diseñados para turbulencia deben de tener como mínimo, suficiente característica de suspensión y tener capacidad para limpiar los agujeros de diámetros grandes.

- **Reología del lodo**

La experiencia ha mostrado que una buena reología del lodo es extremadamente importante para la limpieza del agujero cuando se perfora un pozo de alto ángulo de desviación.

Estudios muestran que los efectos de la reología del lodo y el régimen de flujo en el espacio anular son mutuamente dependientes. En el régimen laminar, al incrementar la viscosidad del lodo mejorará la limpieza del agujero y es particularmente efectivo si el LSRYP es alta. Sin embargo, en el régimen turbulento al reducir la viscosidad del lodo ayudará a eliminar los recortes.

Por lo tanto la reología del lodo debe ser diseñada para evitar el régimen de flujo transicional. Para agujeros de tamaños por arriba de los 8 ½”, el flujo es laminar en la mayoría de las circunstancias. Sin embargo es deseable especificar un mínimo de LSRYP (mayor a 5 es razonable).

En la práctica el nivel óptimo requerido se establece mejor con base en los datos de campo y la experiencia.

- **Gráficas de la limpieza del agujero.**

Una serie de gráficas de la limpieza del agujero que han sido desarrolladas, pueden ser usadas para determinar la velocidad crítica del flujo para varios tamaños de agujeros cuando se perfora un pozo desviado. Estas gráficas se incluyen al final de esta sección.

- **Hidráulica.**

Las perforaciones hidráulicas convencionales dependen de la optimización de la potencia hidráulica o del impacto hidráulico en la barrena. Esto requiere de aproximadamente del 60 al 70% de pérdida de presión del sistema para ser liberado en la barrena.

Para pozos de alto ángulo de desviación, donde las velocidades de flujo para la limpieza del pozo son más altas, es necesario reducir la energía gastada en la barrena; esto se logra mediante la selección de diámetros más grandes de las toberas.

La distribución de las pérdidas de presión a lo largo del sistema de circulación depende de la geometría del pozo y propiedades de los fluidos.

En la perforación convencional, la caída de presión en el espacio anular es generalmente menor al 5% de la pérdida total del sistema (esta proporción

aumenta dramáticamente para configuraciones de pozos de diámetros pequeños).

Mientras que la pérdida de presión en el espacio anular es solo una pequeña fracción de la pérdida total, es decisiva para determinar la densidad equivalente de circulación (DEC).

- **Uso de baches de lodo.**

El uso adecuado de baches de lodo puede mejorar la limpieza del agujero en un pozo de alto ángulo de desviación.

Los baches de alta viscosidad (preferentemente densificados) son a menudo efectivos en agujeros de tamaños más grandes que 8 ½”, mientras que los baches de baja viscosidad son benéficos en agujeros más pequeños.

Cuando se usa un bache de baja viscosidad, es importante mantener la velocidad de flujo mas alta y minimizar los tiempos perdidos en la circulación.

También es necesario, que el bache de baja viscosidad, sea continuado por un bache de viscosidad más alta, para asegurar la adecuada limpieza del pozo en la sección vertical más grande de éste.

Los volúmenes de los baches deben ser determinados con base en el tamaño del agujero y el efecto en la cabeza hidrostática. Los volúmenes típicos usados son:

Intervalos de 17 ½” y 16”	Intervalos de 12 ¼”	Intervalos de 8 ½”
más de 50 barriles	30 a 50 barriles	30 barriles

Nota: No se recomiendan en formaciones débiles, el uso de baja viscosidad en baches con flujo turbulento, pues puede ocurrir derrumbamiento o desestabilización en el pozo.

- **Velocidad de penetración fija.**

Una velocidad de penetración mas alta, requiere una velocidad de flujo más alta para limpiar el agujero. Una buena práctica es perforar el agujero con una velocidad de penetración fija y por consiguiente, seleccionar la velocidad de flujo requerida para limpiar el agujero. En casos donde esto no se pueda lograr, se debe usar una velocidad de penetración promedio, sobre un intervalo de 30 m (100 pies) para seleccionar la velocidad de flujo.

- **Rotación-reciprocación de la tubería de perforación.**

La experiencia ha mostrado que la rotación-reciprocación de la tubería de perforación (TP) es muy efectiva para mejorar la limpieza del agujero, en particular a altas velocidades. Esto es debido a que la rotación-reciprocación

de la TP agitará mecánicamente la cama de recortes y por lo tanto, ayudará a eliminar los recortes.

- **Sección del pozo de diámetro grande.**

Cuando se perforan pozos de alto ángulo de desviación, es necesario comenzar en la sección del pozo con un diámetro grande (22"/24"/26"). Sin embargo, como un pozo desviado de diámetro grande requiere una alta velocidad de flujo para eliminar los recortes, es necesario limitar un ángulo máximo en la sección del agujero, frecuentemente en rangos de 20 a 30 grados. Además el reducir el tamaño del agujero mejorará significativamente la limpieza del agujero, por ejemplo, es mejor perforar, si es posible, un agujero de 22" en vez de 24" o 26".

- **Uso de TP's más grande.**

La presión de la bomba es con frecuencia, el factor limitante para lograr la velocidad de flujo requerida en la limpieza del agujero. Por lo tanto, es necesario usar TP's más grandes que la convencional de 5", tales como de 5 ½" o 6 5/8" para reducir la presión de la bomba. Sin embargo, como el uso de una TP de tamaño más grande da como resultado una mas alta torsión, se debe optimizar su longitud.

- **Circular antes de realizar conexiones o realizar los "viajes".**

Antes de hacer una conexión, se debe circular el agujero a la velocidad de flujo normal, para limpiar los recortes de alrededor de la barrena.

Dependiendo del ángulo del pozo y de la longitud de la barrena, es necesario una circulación de 5 a 10 minutos.

Antes de sacar la tubería, se debe circular el agujero a la velocidad de flujo normal, hasta que las temblorinas estén limpias, y la sarta de perforación tenga una adecuada rotación. Esto puede requerir más de 3 tiempos de atraso, dependiendo del ángulo y tamaño del agujero.

La tabla siguiente enlista los números recomendados para calcular los tiempos de atraso antes de realizar el "viaje".

Ángulo del agujero	8 ½"	12 ¼"	17 ½"
0 -10	1.3	1.3	1.5
10-30	1.4	1.4	1.7
30-60	1.6	1.8	2.5
+ de 60	1.7	2.0	3.0

- **"Viajes" de limpieza.**

Los viajes de limpieza o bombear hacia afuera del agujero, son a menudo efectivos en la eliminación de problemas de la limpieza del pozo. Por lo que,

una buena práctica, cuando se perfora una sección de alto ángulo de desviación, es hacer “viajes” sistematizados de limpieza, es decir, cada 150 o 200 metros dentro de la anterior tubería de revestimiento. Esto es significativo si la velocidad de flujo real esta por debajo o cercano a la velocidad crítica.

- **Adquisición de datos.**

Se aconseja que se registren todos los parámetros de la limpieza del pozo para un futuro; por ejemplo la velocidad de flujo, la reología del lodo vs profundidad, etc.

Los procedimientos del “viaje” deben ser preparados con anticipación en la orientación de los intervalos en que se realizaran los viajes, las velocidades de rotación hacia arriba y en el máximo jalón. Si es necesario éstos procedimientos se pueden modificar en el pozo.

Mediante la medición de la cantidad de recortes en las temblorinas en determinados intervalos, se puede establecer un registro de regreso de recortes, el cual proporcionará información valiosa de las tendencias de los recortes que regresan vs la velocidad de penetración.

- **PWD, Herramienta que mide la presión mientras se perfora.**

La herramienta que miden la presión mientras se perfora (PWD), puede localizar las densidades equivalentes de circulación (DEC) y darse cuenta de la acumulación de recortes en el pozo.

4.5. Agujero descalibrado.

En situaciones donde son comunes las secciones descalibradas, se debe hacer todo esfuerzo para minimizar el agrandamiento del agujero. Factores tales como, el diseño del lodo (químico) y la selección de la densidad del lodo, deben ser optimizados para reducir el problema.

Formaciones pobremente consolidadas pueden ser propensas a erosiones mecánicas e hidráulicas, por consiguiente, se debe realizar el diseño de la hidráulica de la barrena y de las prácticas en la perforación.

Este tipo de problema, causa una reducción en la velocidad anular del lodo, que junto con los grandes derrumbes (y por lo tanto, mayor velocidad de deslizamiento) hacen la limpieza del agujero mucho más difícil.

4.6. Gráficas para la limpieza del pozo.

Las siguientes gráficas han sido realizadas con base en el modelo de la limpieza del pozo, suponiendo condiciones de perforación que son consideradas típicas del Mar del Norte y del Golfo de México. Por lo tanto, estas gráficas no se deben usar en casos donde las condiciones de perforación sean significativamente diferentes de las condiciones supuestas.

GRÁFICAS DE LA LIMPIEZA DEL POZO PARA UN AGUJERO DE 17 ½"

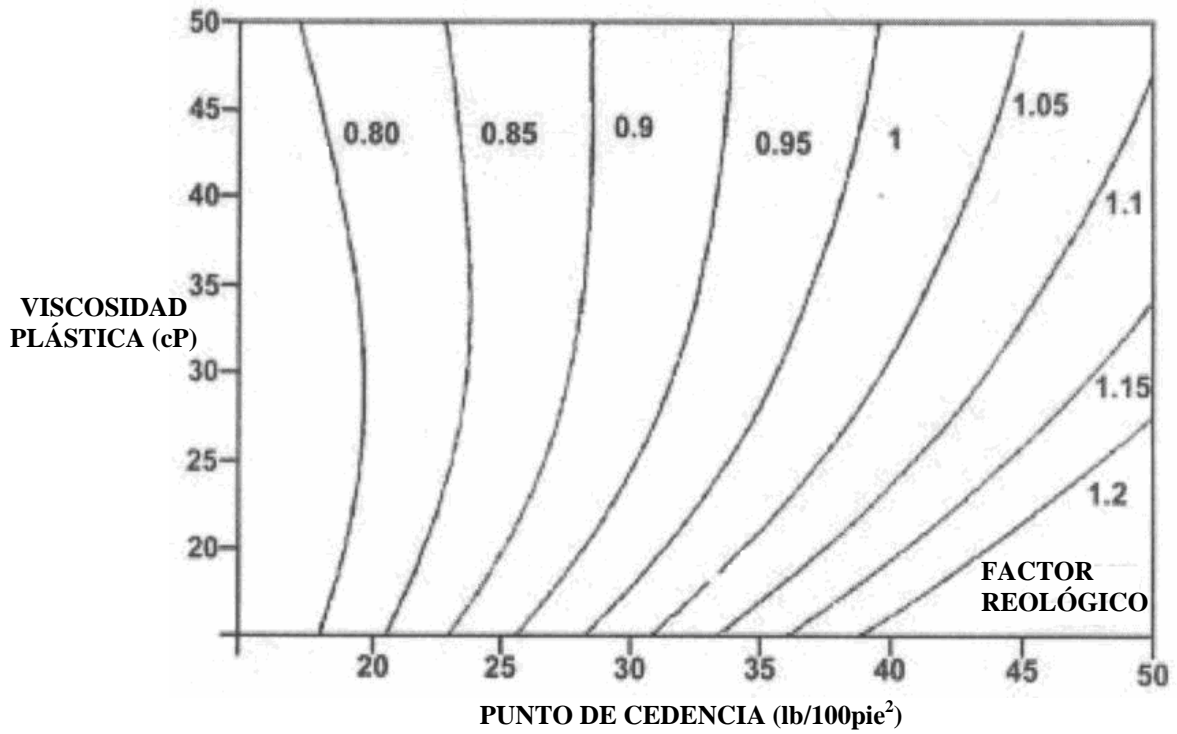


FIGURA 4.3 FACTOR REOLÓGICO PARA AGUJERO DE 17 ½"

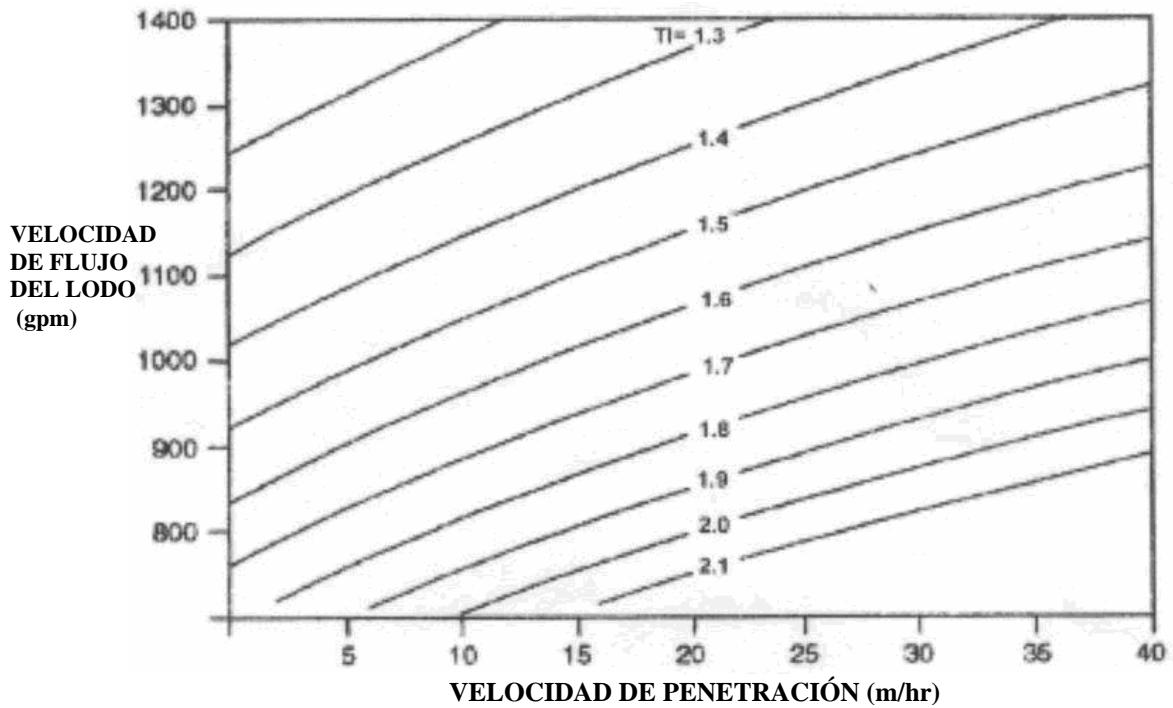


FIGURA 4.4

GRÁFICAS DE LA LIMPIEZA DEL POZO PARA UN AGUJERO DE 12 ¼"

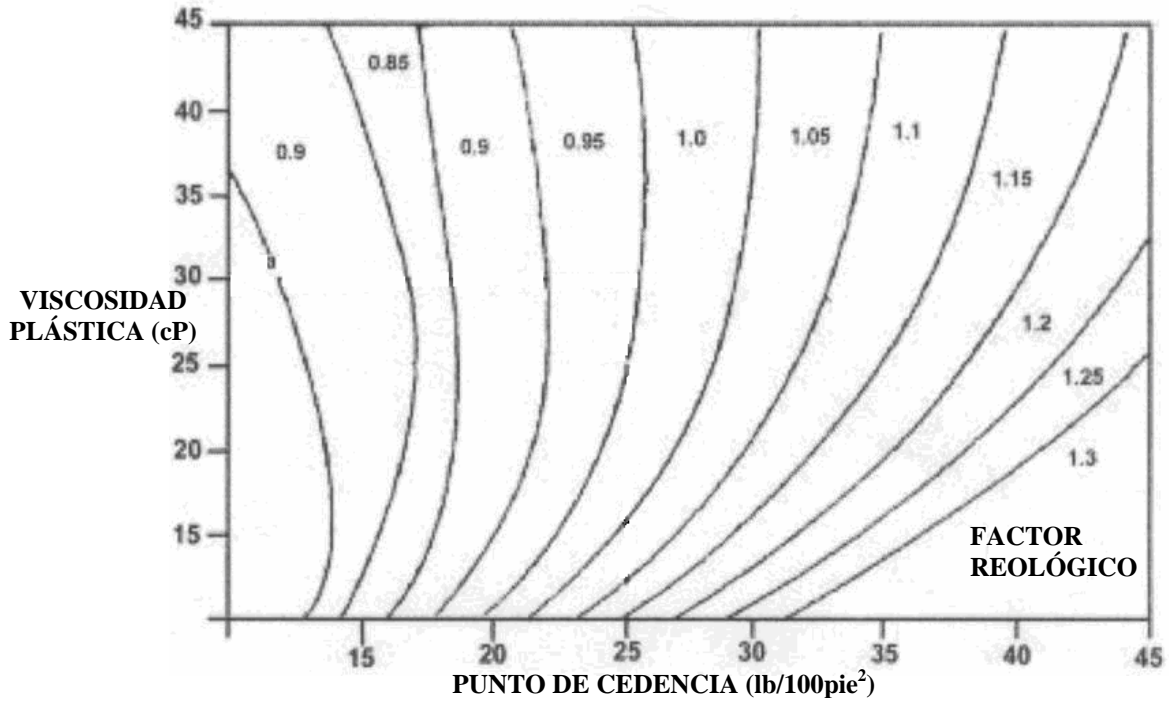


FIGURA 4.5 FACTOR REOLÓGICO PARA AGUJERO DE 12 ¼"

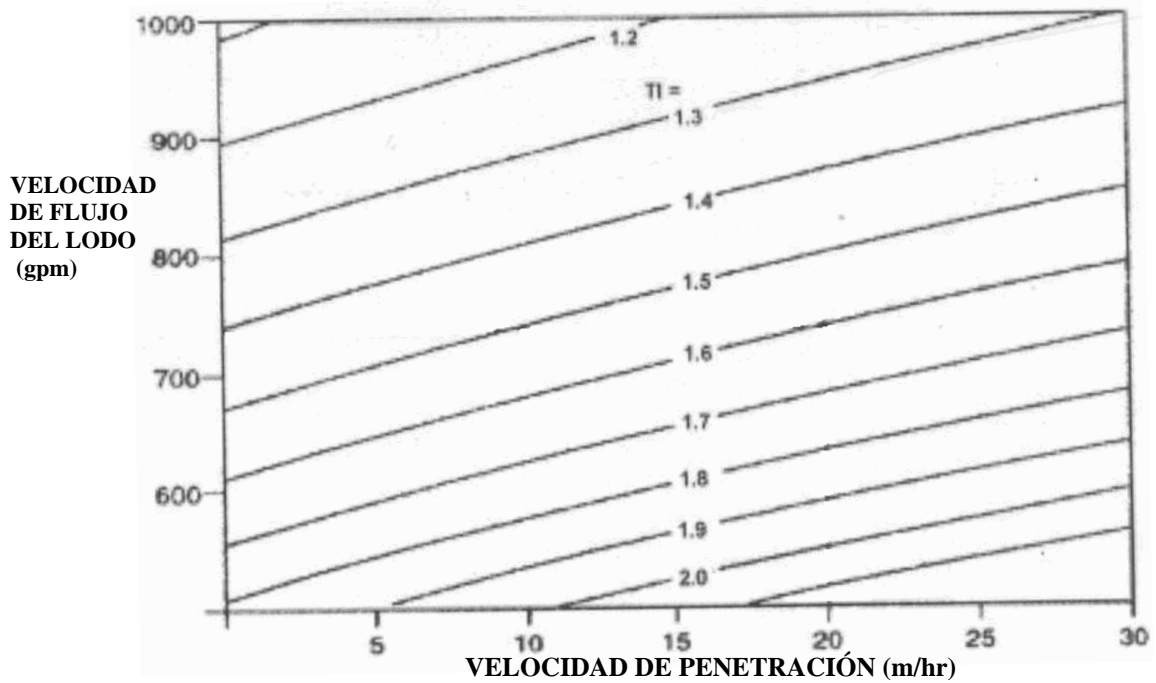


FIGURA 4.6

GRÁFICAS DE LA LIMPIEZA DEL POZO PARA UN AGUJERO DE 8 1/2"

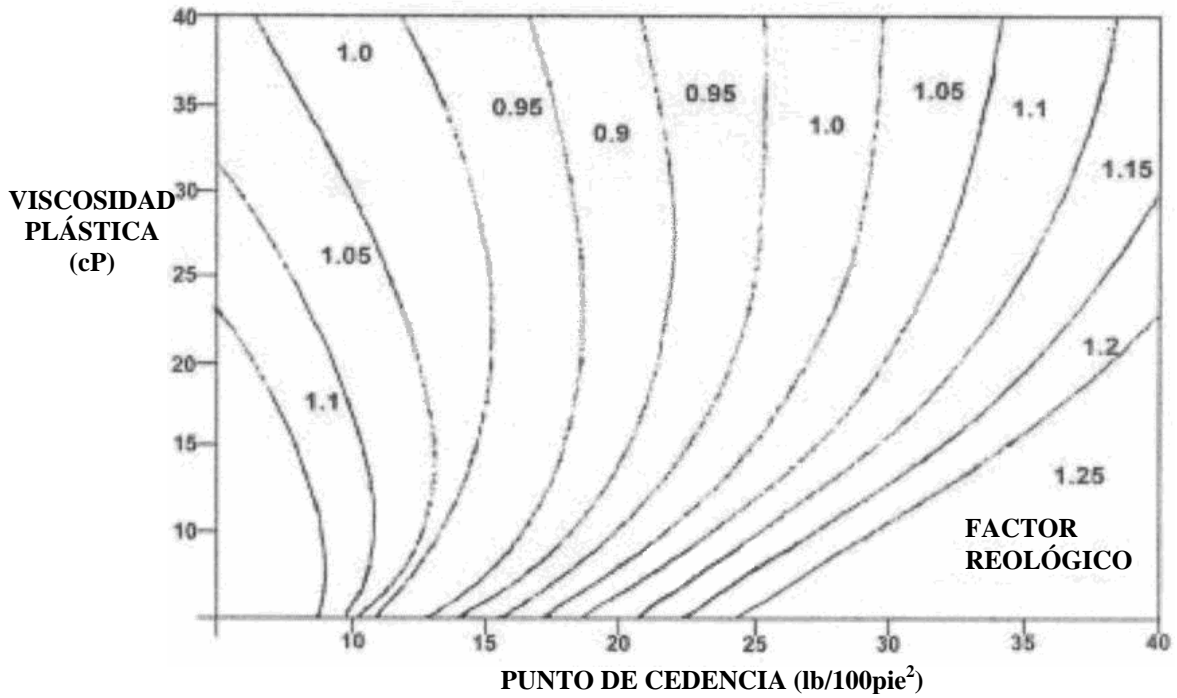


FIGURA 4.7. FACTOR REOLÓGICO PARA AGUJERO DE 8 1/2"

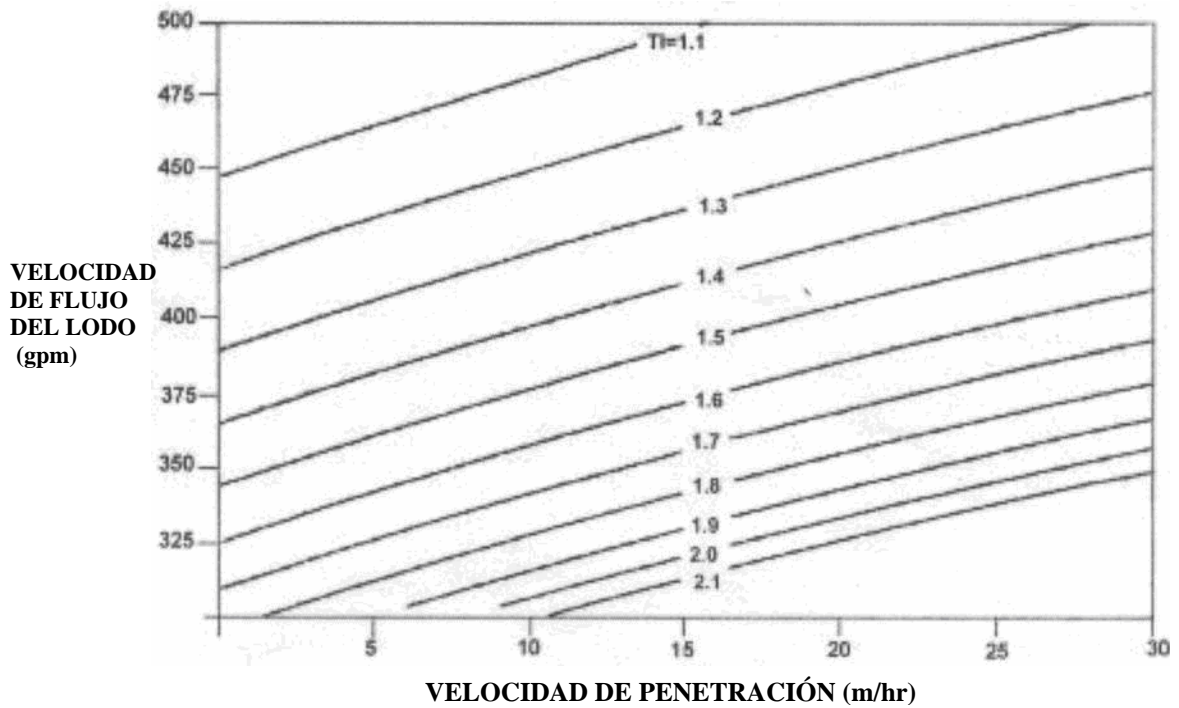


FIGURA 4.8

CAPÍTULO 5

CÁLCULOS DE LA HIDRÁULICA DE LA PERFORACIÓN Y DE LA LIMPIEZA DEL POZO

5.1. Cálculo de la hidráulica para un pozo vertical.^{2,3}

Los cálculos mostrados en ésta sección han sido simplificados; sin embargo, los resultados obtenidos son lo suficientemente precisos para operaciones de campo.

Nota: El significado de la variables y unidades de las siguientes ecuaciones se muestran en la nomenclatura de éste trabajo.

- **Constantes de ley de potencias**

$$n_{TP} = \frac{\log\left(\frac{R_{600}}{R_{300}}\right)}{\log\left(\frac{1022}{511}\right)} = 3.32 \log\left(\frac{R_{600}}{R_{300}}\right)$$

$$n_{EA} = \frac{\log\left(\frac{R_{100}}{R_3}\right)}{\log\left(\frac{170.2}{5.11}\right)} = 0.657 \log\left(\frac{R_{100}}{R_3}\right)$$

- **Índice de consistencia del fluido.**

$$k_{TP} = \frac{5.11R_{300}}{511^{n_{TP}}} \text{ ó } \frac{5.11R_{600}}{1022^{n_{TP}}}$$

$$k_{EA} = \frac{5.11R_{100}}{170.2^{n_{EA}}} \text{ ó } \frac{5.11R_3}{511^{n_{EA}}}$$

- **Velocidad promedio en la tubería.**

$$V_{TP} = \frac{0.408Q}{D_1^2}$$

- **Velocidad promedio en el espacio anular.**

$$V_{EA} = \frac{0.408Q}{(D_2^2 - D_1^2)}$$

- **Viscosidad efectiva en la tubería.**

$$\mu_{e_{TP}} = 100k_{TP} \left(\frac{96V_{TP}}{D_1} \right)^{(n_{TP}-1)} \left(\frac{3n_{TP} + 1}{4n_{TP}} \right)^{n_{TP}}$$

- **Viscosidad efectiva en el espacio anular.**

$$\mu_{e_{EA}} = 100k_{EA} \left(\frac{144V_{EA}}{D_2 - D_1} \right)^{(n_{EA}-1)} \left(\frac{2n_{EA} + 1}{3n_{EA}} \right)^{n_{EA}}$$

- **Número de Reynolds en la tubería.**

$$R_{e_{TP}} = \frac{928V_{TP}D_1\rho}{\mu_{e_{TP}}}$$

- **Número de Reynolds en el espacio anular.**

$$R_{e_{EA}} = \frac{928V_{EA}(D_2 - D_1)\rho}{\mu_{e_{EA}}}$$

Nota: El número de Reynolds debe ser calculado para cada sección de tubería que tienen diferentes diámetros interiores.

- **Factor de fricción en la tubería.**

Si el número de Reynolds es menor o igual a 2100, el factor de fricción en la tubería es:

$$f_{TP} = \frac{16}{R_{e_{TP}}}$$

Si el número de Reynolds es mayor que 2100, el factor de fricción se puede estimar con:

$$f_{TP} = \frac{a}{(R_{e_{TP}})^b}$$

Donde:

$$a = \frac{(\log n_{TP} + 3.93)}{50}$$

$$b = \frac{(1.75 - \log n_{TP})}{7}$$

- **Factor de fricción en el espacio anular.**

Si el número de Reynolds es menor o igual a 2100, el factor de fricción es:

$$f_{EA} = \frac{24}{R_{eEA}}$$

Si el número de Reynolds es mayor que 2100, el factor de fricción se puede estimar con:

$$f_{EA} = \frac{a}{(R_{eEA})^b}$$

Donde:

$$a = \frac{(\log n_{EA} + 3.93)}{50}$$
$$b = \frac{(1.75 - \log n_{EA})}{7}$$

- **Gradiente de pérdida de presión por fricción en la tubería.**

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{TP} = \frac{f_{TP} V_{TP}^2 \rho}{25.81 D_1}$$

Nota: La pérdida de presión por fricción debe ser calculada para cada sección de tubería que tienen diferentes diámetros interiores.

- **Gradiente de pérdida de presión por fricción en el espacio anular.**

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{EA} = \frac{f_{EA} V_{EA}^2 \rho}{25.81 (D_2 - D_1)}$$

Nota: La pérdida de presión por fricción debe ser calculada para cada sección de espacio anular que tienen diferentes diámetros.

- **Gradiente de pérdida de presión fricción total en el espacio anular.**

Si se presente más de una sección anular, se calcula un gradiente de pérdida de presión por fricción promedio para el pozo, mediante la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{EA_Total} = \frac{(\Delta P_1/L_1)L_1 + (\Delta P_2/L_2)L_2 + \dots}{L_{total}}$$

- **Pérdida de presión fricción en la barrena.**

Suponiendo una eficiencia en las toberas de 0.95, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta P_b = \frac{156Q^2 \rho}{(D_{Tob1}^2 + D_{Tob2}^2 + \dots)^2}$$

- **Gradiente de presión hidrostática.**

$$\frac{P_h}{L} = 0.052 \rho$$

- **Gradiente de presión de circulación.**

El gradiente de presión hidrostática más el gradiente de la pérdida de presión por fricción en el espacio anular da como resultado el gradiente de presión de circulación (P_c/L) en el espacio anular. Este se calcula como sigue:

$$\frac{P_c}{L} = \frac{P_h}{L} + \left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{EA}$$

Nota: Si se presenta mas de una sección anular, use el gradiente de pérdida de presión por fricción total en el espacio anular $(\Delta P/L)_{EA_Total}$ para calcular el gradiente de presión de circulación.

- **Densidad equivalente de circulación.**

$$\rho_c = \frac{19.625P_c}{L}$$

- **Presión en la tubería.**

La presión total requerida para circular el fluido hacia la sarta de perforación, a través de la barrena y de regreso a la superficie, es la suma de todas las pérdidas de presión en el sistema circulatorio.

$$P_{TP} = \sum \left(\frac{\Delta P_i}{L_i} \right)_{TP} L_i + \sum \left(\frac{\Delta P_j}{L_j} \right)_{EA} L_j + \Delta P_b$$

Velocidad de asentamiento.

- **Constantes de ley de potencias**

$$n_s = 0.657 \log \left(\frac{R_{100}}{R_3} \right)$$

- **Índice de consistencia del fluido.**

$$k_s = \frac{5.11R_{100}}{170.2^{n_s}} \text{ ó } \frac{5.11R_3}{511^{n_s}}$$

- **Estimación de la velocidad de corte de asentamiento.**

$$\gamma_s = \frac{12V_s}{D_p}$$

Nota: Aquí se supondrá un valor de V_s para poder obtener la estimación de la velocidad de corte de asentamiento.

- **Viscosidad efectiva de asentamiento.**

$$\mu_{e_s} = 100k_s \left(\frac{12V_s}{D_p} \right)^{(n_s-1)}$$

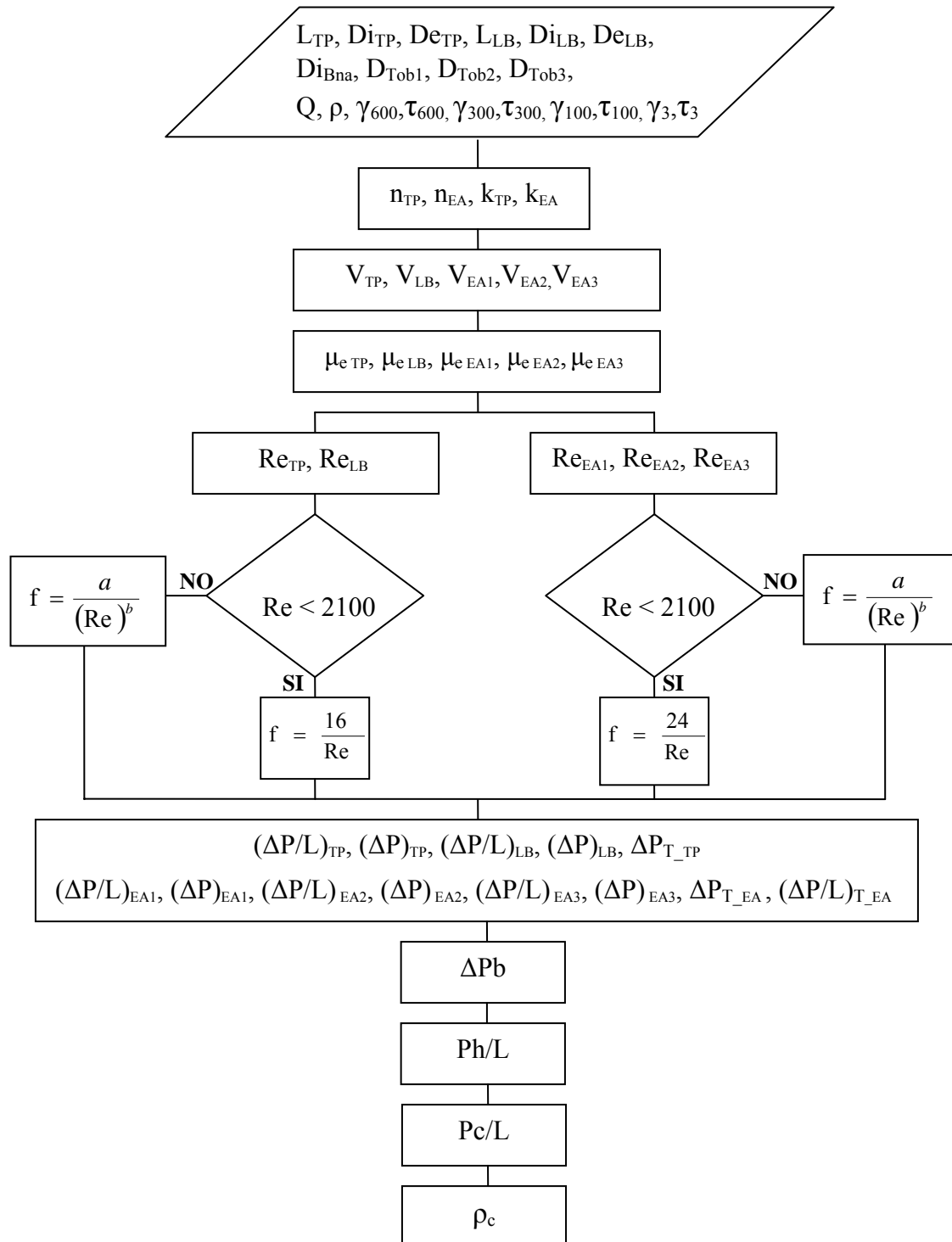
- **Velocidad de asentamiento.**

$$V_s = 0.01294 \left(\frac{\mu_{e_s}}{D_p \rho} \right) \left(\sqrt{1 + (17106.35) \left(D_p \left(\frac{\rho_p}{\rho} - 1 \right) \left(\frac{D_p \rho}{\mu_{e_s}} \right)^2 \right)} \right) - 1$$

- **Eficiencia de Transporte de los recortes.**

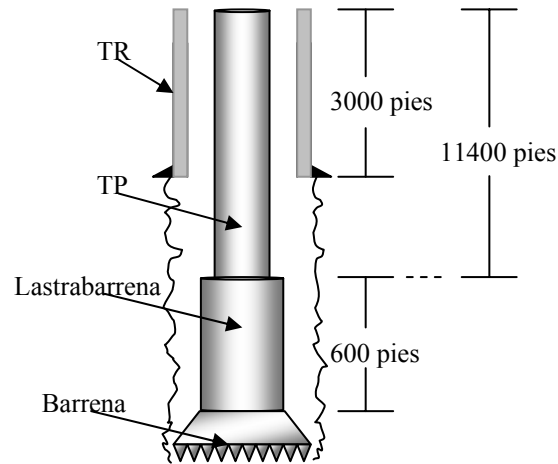
$$E_T = \left(1 - \frac{V_s}{V_a} \right) \times 100$$

Diagrama de flujo para cálculo de la hidráulica.



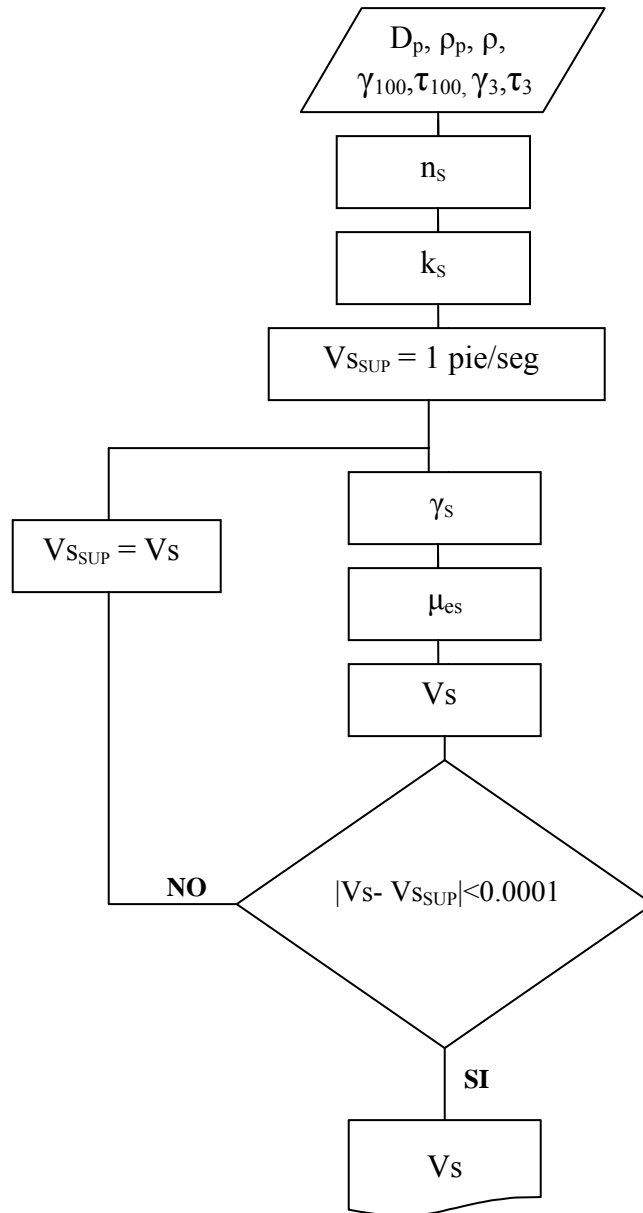
Resultados del cálculo de la hidráulica.

Con ayuda de la hoja de cálculos de Excel se realizaron las operaciones correspondientes para el cálculo de la hidráulica y se obtuvieron los siguientes resultados.



1. Información del Pozo:		2. Constantes de Ley de Potencias (n)	
VELOCIDAD DE FLUJO		a.-Tubería de Perforación	
Q =	280 gal/min	$n_{TP} =$	0.737
DENSIDAD DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN		b.-Espacio Anular	
$\rho =$	12.50 lb/gal	$n_{EA} =$	0.541
TUBERÍA DE PERFORACIÓN		3. Índice de Consistencia del Fluido (K)	
LONGITUD, L_{TP}	11,400 pies	a.-Tubería de Perforación	
DIÁMETRO EXTERIOR, D_{eTP}	4.50 pulg	$k_{TP} =$	2.017 dina seg^{-1}/cm^2
DIÁMETRO INTERIOR, D_{iTP}	3.78 pulg	b.-Espacio Anular	
TUBO LASTRABARRENA		$k_{EA} =$	6.336 dina seg^{-1}/cm^2
LONGITUD, L_{LB}	600 pies	4. Velocidad Promedio en la Tubería (V_p)	
DIÁMETRO EXTERIOR, D_{eLB}	6.5 pulg	a.-Tubería de Perforación	
DIÁMETRO INTERIOR, D_{iLB}	2.5 pulg	$V_{TP} =$	8.00 pie/seg
TUBERÍA SUPERFICIAL DE REVESTIMIENTO		b.-Lastrabarrena	
LONGITUD, L	3,000 pies	$V_{LB} =$	18.28 pie/seg
DIÁMETRO INTERIOR	8.835 pulg	5. Velocidad Promedio en el Espacio Anular (V_{EA})	
BARRENA		a.-Espacio Anular Sección 1. (TR-TP)	
D_{iBNA}	8.5 pulg	$V_{EA1} =$	1.98 pie/seg
D_{TOB}	11 11 12 (1/32) pulg	b.-Espacio Anular Sección 2. (BNA-TP)	
VISCOSIDAD DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN		$V_{EA2} =$	2.20 pie/seg
a.-LECTURA DEL VISCOSIMETRO FANN A 600 rpm		c.-Espacio Anular Sección 3. (BNA-LASTBNA)	
$\tau =$	65 lb/100 pie ²	$V_{EA3} =$	3.81 pie/seg
$\gamma =$	1022 seg ⁻¹	6. Viscosidad efectiva en la Tubería (μ_e)	
b.-LECTURA DEL VISCOSIMETRO FANN A 300 rpm		a.-Tubería de Perforación	
$\tau =$	39 lb/100 pie ²	$\mu_{eTP} =$	53.0 cP
$\gamma =$	511 seg ⁻¹	b.-Lastrabarrena	
c.-LECTURA DEL VISCOSIMETRO FANN A 100 rpm		$\mu_{eLB} =$	38.2 cP
$\tau =$	20 lb/100 pie ²	7. Viscosidad efectiva en el Espacio Anular (μ_e EA)	
$\gamma =$	170.2 seg ⁻¹	a.-Espacio Anular Sección 1. (TR-TP)	
d.-LECTURA DEL VISCOSIMETRO FANN A 3 rpm		$\mu_{eEA} =$	106 cP
$\tau =$	3 lb/100 pie ²	b.-Espacio Anular Sección 2. (BNA-TP)	
$\gamma =$	5.11 seg ⁻¹	$\mu_{eEA} =$	98 cP
		c.-Espacio Anular Sección 3. (BNA-LASTBNA)	
		$\mu_{eEA} =$	55 cP

Diagrama de flujo para el cálculo de la velocidad de asentamiento.



Resultados del cálculo de la velocidad de asentamiento.

Con ayuda de la hoja de cálculos de Excel se realizaron las operaciones correspondientes para el cálculo de la velocidad de asentamiento y se obtuvieron los siguientes resultados.

1. Información del Pozo:	2. Constantes de Ley de Potencias (n)
DIÁMETRO EQUIVALENTE DE LA PARTÍCULA D _p = <input type="text" value="0.50"/> pulg	n_s = 0.541
DENSIDAD DE LA PARTÍCULA ρ _p = <input type="text" value="22.50"/> lb/gal	3. Índice de Consistencia del Fluido (K)
DENSIDAD DEL LODO ρ = <input type="text" value="12.50"/> lb/gal	k_s = 6.336 dina seg ⁻¹ cm ²
VISCOSIDAD DEL LODO c.-LECTURA DEL VISCOSIMETRO FANN A 100 rpm τ = <input type="text" value="20"/> lb/100 pie ² γ = <input type="text" value="170.2"/> seg ⁻¹	4. Estimación de la Velocidad de Corte de Asentamiento (γ_s)
d.-LECTURA DEL VISCOSIMETRO FANN A 3 rpm τ = <input type="text" value="3"/> lb/100 pie ² γ = <input type="text" value="5.11"/> seg ⁻¹	Suponga: V_s = <input type="text" value="1"/> pie / seg <input type="button" value="Calcular V<sub>s</sub>"/>
	γ_s = 18.77 seg ⁻¹
	5. Viscosidad Efectiva (μ_{es})
	μ_{es} = 165 cP
	6. Aproximación de la Velocidad de Asentamiento (V_s)
	V_s = 0.782 pie / seg

Por lo tanto haciendo el cálculo de la Eficiencia de Transporte de los recortes:

$$E_T = \left(1 - \frac{V_s}{V_a}\right) \times 100 = \left(1 - \frac{0.782}{1.98}\right) \times 100 \cong 60.50\%$$

Donde $V_a = V_{EA1}$

Para una limpieza adecuada, se requiere como mínimo una eficiencia de transporte del 50% por lo que, de la ecuación 2.44:

$$V_{a\min} = 2 \times (0.782) = 1.56 \text{ pie/seg}$$

$$Q_{\min} = 2.448 \times 1.56 (8.835^2 - 4.5^2) \cong 221 \text{ gpm}$$

5.2. Cálculo de la limpieza de un pozo con ángulo de desviación de 60°. ^{6,7}

Datos:

Tamaño del agujero= 8 ½ ”

Desviación del pozo= 60°

Densidad del lodo= 1.5 [sg] (12.5 [lb/gal])

Viscosidad plástica= 26 [cP]

Punto de cedencia= 13 [lb/100pies²]

Velocidad de penetración (ROP) = 20 [m/hr]

Determinar la velocidad de flujo (gasto) requerida para limpiar el pozo, suponiendo:

- 1.-Agujero medido
- 2.-Agujero descalibrado a 13 ½ ”.

1. Agujero medido.

- a) Encontrar la gráfica correspondiente para la limpieza de pozos con agujero de 8 ½ ”.
- b) Obtener el Factor de Reología (FR) de la gráfica Viscosidad Plástica vs Punto de cedencia.
- c) Obtener el Factor Ángulo (FA) de la siguiente tabla, mediante el ángulo de desviación del pozo.

Ángulo	30	35	40	45	50	55	60	65	70-80
FA	1.39	1.31	1.24	1.18	1.14	1.10	1.07	1.05	1.02

- d) Calcular el Índice de Transporte (IT) con FR, FA y la densidad del lodo en SG o en lb/gal, mediante la siguiente ecuación:

$$IT = \rho[sg] \times FR \times FA \quad \text{ó} \quad IT = \frac{\rho[lb/gal] \times FR \times FA}{8.33}$$

- e) Si el agujero esta descalibrado, se necesita corregir el IT, sino no es necesario.
- f) Con el IT, obtener la velocidad de flujo (gasto) requerido para limpiar el agujero de la gráfica de velocidad de flujo vs ROP.

Operaciones y resultados para un pozo de 60° de desviación.

- Con viscosidad plástica=26 y punto de cedencia=13, se entra en la gráfica de agujero de 8 ½ ” y se obtiene el factor de reología, FR=0.98.
- De la tabla, para un ángulo de desviación de 60° el FA=1.07.
- El Índice de Transporte es:

$$IT=1.5 \times 0.98 \times 1.07=1.57$$

- Con ROP=20m/hr y IT=1.57, de la gráfica de 8 ½ " se obtiene una velocidad de flujo (gasto) requerida de 393 gpm, para limpiar el agujero con ángulo de desviación de 60°.

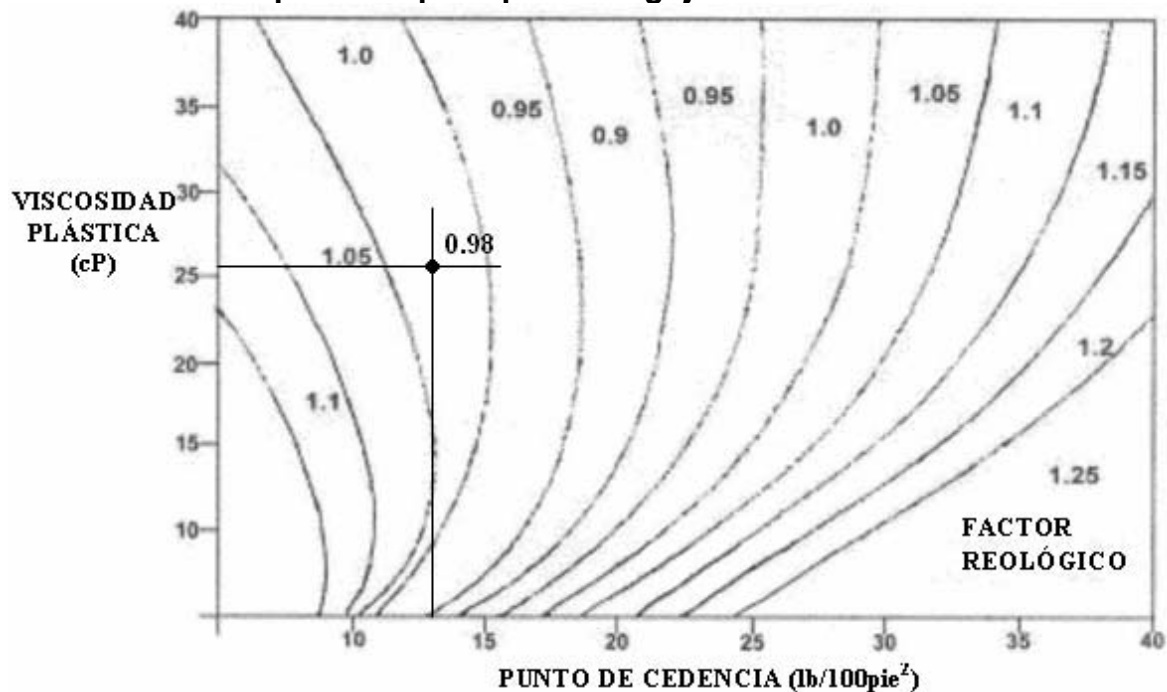
Operaciones y resultados para un pozo de 30° de desviación

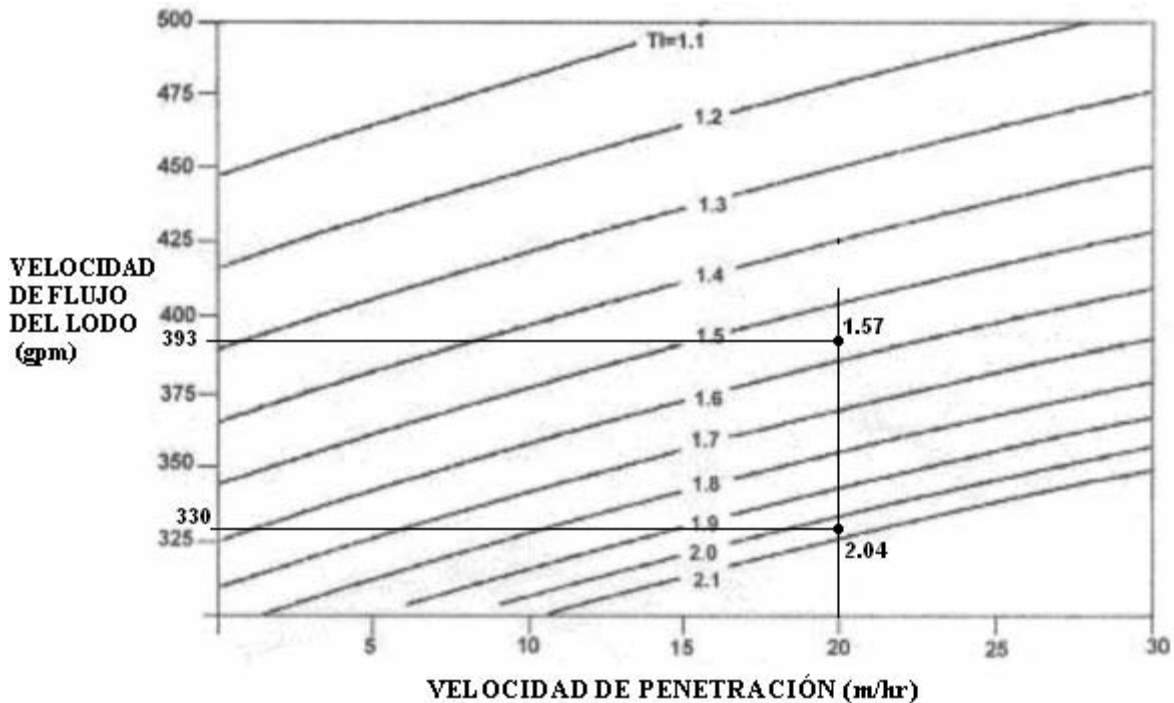
- Con viscosidad plástica=26 y punto de cedencia=13, se entra en la gráfica de agujero de 8 ½ " y se obtiene el factor de reología FR=0.98.
- De la tabla, para un ángulo de desviación de 30° el FA=1.39.
- El Índice de Transporte es:

$$IT=1.5 \times 0.98 \times 1.39=2.04$$

- Con ROP=20m/hr y IT=2.04, de la gráfica de 8 ½ " se obtiene una velocidad de flujo (gasto) requerida de 330 gpm, para limpiar el agujero con ángulo de desviación de 30°.

Gráficas de la limpieza del pozo para un agujero de 8 ½ " .





2. Agujero descalibrado a 13 ½”.

- La velocidad de flujo requerida se debe determinar con base en el tamaño real del agujero, el cual es de 13 ½”.
- Como el agujero esta descalibrado, se necesita corregir el IT.
- Obtener el IT corregido con el diámetro del pozo descalibrado (Dw), el IT obtenido anteriormente y la siguiente ecuación:

$$IT_{\text{corregido}} = \frac{2.44 \times IT}{(0.38 \times Dw) - 2.22}$$

- Con el IT corregido, obtener la velocidad de flujo (gasto) requerido para limpiar el agujero de la gráfica de velocidad de flujo vs ROP.

Operaciones y resultados para 60° de desviación con agujero descalibrado.

- Como el agujero esta descalibrado se obtiene el Índice de Transporte corregido (IT corregido):

$$IT_{\text{corregido}} = \frac{2.44 \times 1.57}{(0.38 \times 13.5) - 2.22} = 1.31$$

- De la gráfica, con ROP=20m/hr y $IT_{\text{corregido}}=1.31$, se obtiene un gasto de 447 gpm requeridos para limpiar el agujero descalibrado.

Operaciones y resultados para 30° de desviación con agujero descalibrado.

- Como el agujero esta descalibrado se obtiene el Índice de Transporte corregido (IT corregido):

$$IT_{\text{corregido}} = \frac{2.44 \times 2.04}{(0.38 \times 13.5) - 2.22} = 1.71$$

- De la gráfica, con ROP=20m/hr y $IT_{\text{corregido}}=1.71$, se obtiene un gasto de 367 gpm requeridos para limpiar el agujero descalibrado.

5.3. Análisis de resultados.

Para el cálculo de la hidráulica del pozo vertical.

De las constantes reológicas, el índice de consistencia K, es un indicativo de la consistencia del fluido, es decir, si el valor de K es alto, el fluido es mas viscoso y viceversa. En tanto que el índice de comportamiento de flujo n, es una medida de la no-Newtonianidad del fluido, por lo que, entre menor sea de la unidad ($n < 1$) el valor de n, más no-Newtoniano es el comportamiento del fluido.

Entonces de los resultados obtenidos podemos decir que, K tiene una alta viscosidad y en el espacio anular la tendencia del índice de comportamiento de flujo es no-Newtoniano.

Bajo las condiciones mostradas en el problema, del Número de Reynolds (NRe) obtenido en la tubería, nos podemos percatar que el régimen de flujo es turbulento, ya que el NRe es mayor a 2100, pero cambia a régimen laminar en el espacio anular pues el NRe es menor a 2100.

Con la información del pozo dada, se obtuvo que la eficiencia de transporte de los recortes es de aproximadamente 60.5%, lo que nos indica que existe una buena limpieza del agujero y que el gasto mínimo que se requiere para que siga existiendo una buena limpieza es de aproximadamente 221 gpm.

Para el cálculo de la limpieza del pozo desviado.

Tabla comparativa del ángulo de desviación.

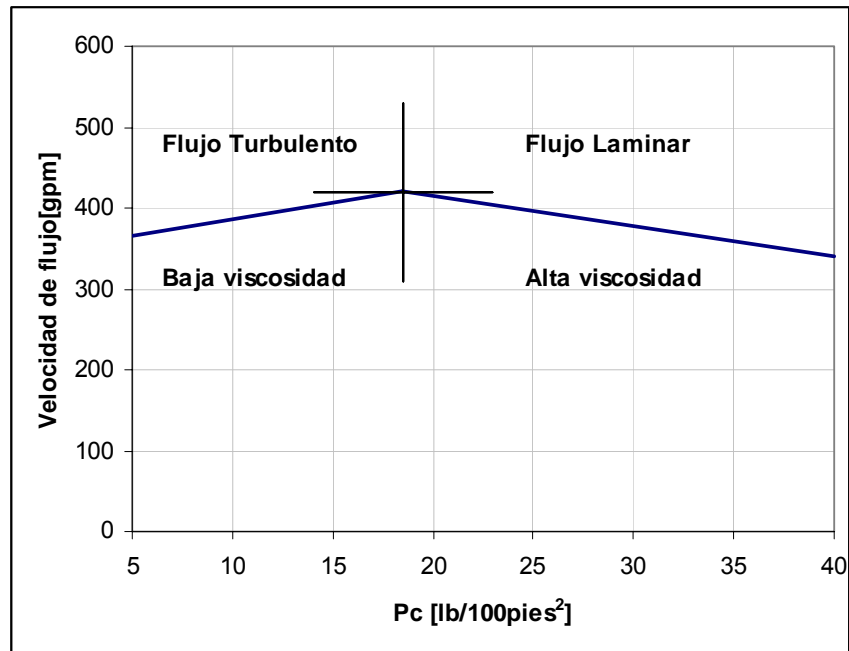
	Ángulo de 60° de desviación	Ángulo de 30° de desviación
Q [gpm] del pozo medido	393	330
Q [gpm] del pozo descalibrado a 13 ½"	447	367

Se pudo observar que al variar, únicamente, el ángulo de desviación, varia el gasto requerido para hacer la limpieza del pozo, es decir, entre mayor sea el ángulo de desviación, se requiere de una mayor velocidad de flujo para limpiar el

pozo de manera eficiente. Esto se pudo analizar gracias a los resultados obtenidos tanto para un ángulo de desviación de 60° como uno de 30°.

Además se observa, con los resultados de la tabla, que en las secciones donde el pozo aumenta de diámetro (pozo descalibrado) se requiere de una mayor velocidad de flujo anular, para poder realizar una buena limpieza en el pozo.

Con la información dada para la limpieza del agujero de 8 ½" con ángulo de desviación de 60° y variando únicamente el punto de cedencia se obtuvo la siguiente gráfica.



Esta gráfica nos muestra como el incremento en el punto de cedencia provoca que el mecanismo de flujo cambie de turbulento a laminar. De la gráfica, se deben evitar los valores intermedios del punto de cedencia ya que producen las peores condiciones para el transporte de recortes. En general se prefieren los puntos de cedencia mas altos (es decir, flujo laminar) porque la mas alta viscosidad del fluido de perforación provee mejor suspensión en los recortes y mejora el transporte de los recortes del pozo.

Sin embargo, en pozos altamente desviados es importante las características del flujo turbulento, ya que evita la formación de camas de recortes.

De aquí, se observan los efectos del punto de cedencia sobre la velocidad de flujo. Y lo que nos indica es que se tendrá flujo turbulento en un intervalo de gasto de 360 a 410 gpm y en un intervalo de punto de cedencia de 5 a 18 lb/100pie². Mientras que habrá flujo laminar en el espacio anular, en un intervalo de gasto de 340 a 420 gpm y en un intervalo de punto de cedencia de 19 a 40 lb/100pie².

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.

La premisa de este trabajo es dejar en claro que no existen soluciones puntuales a la gran cantidad de variables que afectan la continuidad de la perforación de pozos petroleros y debido a que no es posible eliminar por completo los tiempos no productivos en la perforación de pozos petroleros, este trabajo consideró algunos factores que ayudarían a reducir al mínimo estos tiempos, como lo es, el optimizar el sistema hidráulico del equipo de perforación y mejorar la eficiencia de la limpieza del pozo.

Las variables que se pueden controlar para optimizar la hidráulica y mejorar la eficiencia de la limpieza del pozo son el gasto(velocidad de flujo) y la viscosidad.

Para controlar el gasto adecuadamente es importante conocer el tipo y características de las bombas de lodos, así como también es indispensable mantenerlas en condiciones óptimas de operación, ya que un gasto excesivo puede provocar derrumbes, agujeros erosionados, etc. y un gasto bajo puede ocasionar una limpieza ineficiente del pozo, entre otros.

La viscosidad y el punto de cedencia son variables que permite controlar el régimen de flujo necesario en el espacio anular para obtener una buena limpieza del agujero.

Para alcanzar una eficiente limpieza del agujero en el espacio anular se logra con puntos de cedencia más altos, es decir, flujo laminar, sin embargo en pozos altamente desviados son importantes las características del flujo turbulento, debido a que evita la formación de camas de recortes.

Otro factor que ayuda a optimizar la hidráulica y a mejorar la eficiencia de la limpieza del pozo es el equipo de control de sólidos, ya que en la medida en que los sólidos de formación sean eliminados del sistema tan pronto lleguen a la superficie, la perforación de un pozo será más eficiente.

Recomendaciones

Para la limpieza de pozos desviados se sugiere la aplicación del método gráfico, porque en la práctica, los gastos requeridos para la limpieza de pozos desviados son difíciles de obtener.

Así también, se aconseja realizar las gráficas correspondientes de punto de cedencia vs velocidad de flujo, donde muestra como el incremento del punto de cedencia provoca que el régimen de flujo cambie de turbulento a laminar.

Es recomendable utilizar materiales de baja gravedad específica, como la bentonita, polímeros, entre otros para obtener el régimen de flujo deseado.

El equipo de control de sólidos debe estar diseñado de manera que garantice un fluido limpio y libre de sólidos indeseables, asimismo que el arreglo y cantidad del equipo se calcule en función del gasto de lodo utilizado en la perforación de cada etapa. También se deberá mantener en óptimas condiciones de operación cada uno de los elementos que integran el equipo de control de sólidos para un mejor desempeño del sistema.

Para que haya una separación de sólidos más eficiente se sugiere que:

En los tanques de lodo, los compartimientos deben estar acondicionados de tal manera que las succiones y descargas permitan que cada uno de los equipos trabaje en forma secuencial progresiva, realizando la separación de sólidos de mayor a menor tamaño.

En las temblorinas, se ajuste el ángulo de las canastas de tal manera que el fluido cubra el 80% de la longitud de la malla. Además cuando se perfora lutitas plásticas, utilizar temblorinas primarias de movimiento circular o elíptico balanceado y utilizar en las temblorinas secundarias movimiento lineal de alto impacto y en la medida de lo posible utilizar las mallas más finas.

En los hidrociclones, utilizar el desarenador cuando no se puedan emplear mallas mayores a 140 mesh en las temblorinas y no utilizar las mismas bombas centrífugas para alimentar el desarenador y el desarcillador.

Es recomendable, que para tomar decisiones correctas que impacten en la solución del problema, se lleve una estadística detallada de los problemas de la hidráulica; ya que nos ayudará a determinar con exactitud el carácter interno y externo de las fallas.

Uno de los aspectos más importantes en el proceso de la eficiencia de la perforación de pozos es el factor humano, ya que se necesita personal con capacidad, motivación y orgullo por su trabajo, porque cualquier persona que se sienta orgullosa de la actividad que realiza, tratará de que ésta sea de mejor calidad y mayor eficiencia.

NOMENCLATURA

C = conductancia [mD/mm]
C_t = conductancia total [mD/mm]
D_{Tob} = diámetro de las toberas de la barrena [1/32 pulg]
D₁ = diámetro interior de la tubería [pulg]
D_{1TR} = diámetro interior de la tubería de revestimiento [pulg]
D₂ = diámetro exterior de la tubería [pulg]
D_{2TP} = diámetro exterior de la tubería de perforación [pulg]
D_P = diámetro equivalente de la partícula [pulg]
D_W = diámetro del pozo descalibrado [pulg]
E_V = eficiencia volumétrica de la bomba [%]
E_T = eficiencia de transporte de recortes [%]
FA = factor ángulo [adimensional]
Fb = fuerza de impacto hidráulico [lbf]
f_{EA} = factor de fricción en el espacio anular [adimensional]
f_{TP} = factor de fricción en la tubería [adimensional]
FR = factor de reología [adimensional]
HPs = potencia hidráulica superficial [HP]
HPb = potencia hidráulica en la barrena [HP]
IT = índice de transporte [adimensional]
IT_{corregido} = índice de transporte corregido [adimensional]
k_{TP} = índice de consistencia del fluido en la tubería [dina seg⁻¹/cm²]
k_{EA} = índice de consistencia del fluido en el espacio anular [dina seg⁻¹/cm²]
k_S = índice de consistencia del fluido en el asentamiento [dina seg⁻¹/cm²]
L = Longitud de la tubería de perforación [pies]
L_{TOTAL} = Longitud total de la tubería de perforación [pies]
n_{TP} = índice de comportamiento de flujo en la tubería [adimensional]
n_{EA} = índice de comportamiento de flujo en el espacio anular [adimensional]
n_s = índice de comportamiento de flujo en el asentamiento [adimensional]
P_C = presión de circulación [lb/pulg²]
P_C/L = gradiente de presión de circulación [lb/pulg²/pie]
P_h = presión hidrostática [lb/pulg²]
P_h/L = gradiente de presión de hidrostática [lb/pulg²/pie]
P_s = presión superficial de bombeo [lb/pulg²]
P_{TP} = presión en la tubería [lb/pulg²]
Q = velocidad de flujo (gasto) [gal/min]
Q_{a min} = velocidad de flujo (gasto) en el espacio anular mínima [gal/min]
R₆₀₀ = lectura del viscosímetro @ a una velocidad de corte de 600 rpm [lb/100pie²]
R₃₀₀ = lectura del viscosímetro @ a una velocidad de corte de 300 rpm [lb/100pie²]
R₁₀₀ = lectura del viscosímetro @ a una velocidad de corte de 100 rpm [lb/100pie²]
R₃ = lectura del viscosímetro @ a una velocidad de corte de 3 rpm [lb/100pie²]
Re_{TP} = número de Reynolds en la tubería [adimensional]

Re_{EA} = número de Reynolds en el espacio anular [adimensional]
 ROP = velocidad de penetración [m/hr]
 R_T = Relación de transporte [pie/seg]
 sg = gravedad específica o densidad relativa [adimensional]
 V_{EA} = velocidad en el espacio anular [pie/seg]
 $V_{a\ min}$ = velocidad en el espacio anular minima [pie/seg]
 V_S = velocidad de asentamiento [pie/seg]
 V_{Ssup} = velocidad de asentamiento supuesta [pie/seg]
 V_t = velocidad terminal de asentamiento [pie/seg]
 V_T = velocidad de transporte [pie/seg]
 V_{TP} = velocidad en la tubería [pie/seg]
 V_n = velocidad del fluido a través de las toberas [pies/seg]
 γ = velocidad de corte [seg^{-1}]
 γ_s = velocidad de corte en el asentamiento [seg^{-1}]
 τ = esfuerzo de corte [lb/pie²]
 μ = viscosidad [cP]
 $\mu_{e\ EA}$ = viscosidad efectiva en el espacio anular [cP]
 $\mu_{e\ TP}$ = viscosidad efectiva en la tubería [cP]
 $\mu_{e\ S}$ = viscosidad efectiva en el asentamiento [cP]
 ρ = densidad del fluido de perforación [lb/gal]
 ρ_c = densidad equivalente de circulación [lb/gal]
 ρ_p = densidad de la partícula [lb/gal]
 ΔP = caída o pérdida de presión por fricción [lb/pulg²]
 ΔP_b = caída o pérdida de presión por fricción en la barrena [lb/pulg²]
 ΔP_p = caída o pérdida de presión por fricción parásita [lb/pulg²]
 ΔP_{cs} = caída o pérdida de presión por fricción a través de las conexiones superficiales [lb/pulg²]
 ΔP_{TP} = caída o pérdida de presión por fricción en el interior de la tubería de perforación [lb/pulg²]
 ΔP_{LB} = caída o pérdida de presión por fricción a través de las lastrabarreras [lb/pulg²]
 ΔP_{TPa} = caída o pérdida de presión por fricción en el espacio anular, alrededor de la tubería de perforación [lb/pulg²]
 ΔP_{Lba} = caída o pérdida de presión por fricción a través del espacio anular, alrededor de las lastrabarreras [lb/pulg²]
 $(\Delta P/L)_{TP}$ = gradiente de la pérdida de presión por fricción en la tubería [lb/pulg²]
 $(\Delta P/L)_{EA}$ = gradiente de la pérdida de presión por fricción en el espacio anular [lb/pulg²]
 $(\Delta P/L)_{EA_TOTAL}$ = gradiente de la pérdida de presión por fricción total en el espacio anular [lb/pulg²]

REFERENCIAS

1. Informe interno de Pemex Exploración y Producción, Gerencia de Perforación y Mantenimiento de Pozos.
2. API RP13D: Recomendad Practice on the Rheology and Hydraulics of Oil-well Drilling Fluids, 4th Edición, mayo de 2003
3. Leon Loya, J.G.;Hidráulica de Perforación, Pemex Exploración y Producción, Gerencia de Perforación y Mantenimiento de Pozos.
4. Guía de diseño y selección del equipo de control de sólidos. Pemex, Gerencia de Ingeniería, Subgerencia de Ingeniería de Perforación.
5. Notas del curso de control de sólidos Pride-Swaco.
6. Drilling Fluids Manual of BP and Chevron Texaco, enero de 2002.
7. API RP13D: Recomendad Practice on the Rheology and Hydraulics of Oil-well Drilling Fluids, 5th Edición, junio de 2006.
8. James L. Lummus/J.J. Azar: "Drilling Fluids Optimization, A Practical field approach".
9. H.C.H. Darley George R. Gray. "Composición and properties of drilling and completion fluids".
10. API boletín "The Reology of Oil-well Drilling Mud"; American Petroleum Institute; API BUL 13D; Second Edition, mayo de 1985.
11. Eirich, F.R.: Rheology Theory and Applications; Vol. 3; Academic Press., Inc.
12. Metzner, A.B. y Reed, J.C.: "Flow of Non-Newtonian Fluid. Correlation of the Laminar, Transition and Turbulent-Flow Regions"; A.I.Ch.E. Jour.; Vol. 1, 434 (1955).
13. Streeter, V.L.: Handbook of Fluid Dynamics; McGraw Hill Book Co., Inc.; New York (1961).
14. Van Wazer, et.al.: Viscosity and Flow Measurement: A Laboratory Handbook of Rheology; Interscience Publishers (1963).
15. Azar, J.J.: DRILLING OPTIMIZATION; The University of Tulsa; Tulsa, OK.
16. Randall, B.V. y Anderson, D.B.: "Flow of Mud During Drilling Operations"; J. Pet. Tech.; julio, 1982.
17. Scott, K.F.: "A New Approach to Drilling Hydraulics"; Petroleum Engineer.
18. Zamora, M. y Lord, D.L.: "Practical Analysis of Drilling Mud Flow in Pipes and Annuli"; Paper SPE 4976, Presented at the SPE-AIME 49th Annual Fall Meeting, Houston; October 6-9, 1974.

-
19. Azar, J.J.; PETROLEUM ENGINEERING; The University of Tulsa; Tulsa, OK.
 20. Craft, B.C., Holden, W.R. y Graves, E.D.: Well Design Drilling and Production; Prentice Hall, New Jersey 1962.
 21. Eckel, J.R. y Bielstein, W.J.: "Nozzle Design and Its Effect on Drilling Rate and Pump Operation"; API Drilling and Production Practice, 1951.
 22. Williams, C.E., Bruce, G.H.: "Carrying Capacity of drilling Muds"; Transactions of AIME; 1951; Vol. 191.
 23. Zeidler, H.U.: "Fluid and Drilled Particle Dynamics Related to Drilling Mud Carrying Capacity"; Ph. Disertación, The University of Tulsa, 1974.
 24. Sample, K.J., Bourgoyne, A.T.: "Development of Improved Laboratory and Field Procedures for Determining the Carrying Capacity of Drilling Fluids"; SPE Paper No. 7497.