



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“MANUAL TEORICO PRÁCTICO  
PARA LA SELECCIÓN Y APLICACIÓN  
DE FLUIDOS DE PERFORACION”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO PETROLERO**

**P R E S E N T A:**

**ENRIQUE RODRÍGUEZ BAUTISTA**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**QUÍM. ROSA DE JESÚS HERNÁNDEZ ÁLVAREZ**



**MÉXICO, D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA,  
SEPTIEMBRE 2010.**



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.

## DEDICATORIA

Esta tesis la dedico para:

Mi padre **Enrique Rodríguez Castañeda** por sus sacrificios, comprensión, amor, ser el guía de mi camino, ser mi inspiración y el pilar de mi familia Rodríguez Bautista.

Mi madre **Irma Bautista Fragoso** por sus sacrificios, comprensión, amor, todo el tiempo que me ha dedicado y lo que ha hecho en mi vida.

Mis abuelos **Miguel Rodríguez<sup>†</sup>, María Castañeda, Isauro Bautista y Otilia Fragoso** por darme unos magníficos padres.

Mi hermana **Irma Rodríguez Bautista su esposo Omar Rivero González y mi sobrino Emilio Omar Rivero Rodríguez** por su apoyo, confianza, y ser parte de mi vida.

Mi esposa **Alma Patricia Ríos Ortega y mi Hijo Enrique Rodríguez Ríos** por haber llegado a mi vida y ayudarme a dar un paso más en mi vida.

Mi tío **Saúl Bautista Fragoso** por haber impulsado a modificar mi vida, por su fe y comprensión, por ser un ejemplo a seguir y por su apoyo que me ha dado.

A mis **tías, tíos y a sus familias** por su ayuda, preocupación y comprensión cuando los he necesitado.

A mis **primos y primas, sobrinos y sobrinas** porque quiero motivarlos y expresarles que cada logro que tengan y cada meta que cubran dará una gran satisfacción para sí mismos y para toda la familia.

## AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincera gratitud y aprecio a las siguientes personas porque sin sus contribuciones, apoyo y aliento no hubiera sido capaz de llegar a esta meta.

Al **Quim. Rosa de Jesús Hernández Álvarez** por su apoyo incondicional, entusiasmo, devoción, orientación, liderazgo, visión, experiencia, por su valioso tiempo, por su incansable trabajo, por sus buenas enseñanzas, facilidades, recomendaciones un digno ejemplo a seguir y le agradezco todas sus atenciones. Gracias por su visión y experiencia que me motivaron a tomar diversos juicios para la finalización de la licenciatura y caminos posteriores.

Un fuerte agradecimiento a mi **jurado de examen**, por sus consejos y observaciones hechas tanto de mi tesis como a mi persona: Ing. Jaime Ortiz Ramírez, Quim. Rosa de Jesús Hernández Álvarez, Ing. Q. María Cristina Avilés Alcántara, Dr. Martha Cecopieri Gómez, Ing. Agustín Velasco Esquivel.

Quiero dar las gracias a **mis profesores** por haber aportado cada uno su grano de arena para llegar y formar hoy a un profesionista y por su amistad: Ing. Guillermo Trejo Reyes, Ing. Martín Carlos Velázquez Franco, Dr. Rafael Rodríguez Nieto, Mario Becerra Zepeda, Jaime Ortiz, Manuel Reyes Aguirre, Javier Arellano Gil, Manuel Silva, Iván Santamaría, Ulises Neri Flores, José Luis Hernández Ramírez.

A mis **amigos** y **amigas**, incluyendo en algunos casos a sus familias, por las increíbles experiencias y lecciones que hemos pasado a lo largo de nuestra amistad, por los buenos y malos tiempos, por compartir, departir y demás: Eduardo Chilpa, Darío, Jacobo, David Guzmán Arévalo, Rubén Rodríguez Tapia,

Jonás Cobos, Antonio Sil, Fernando González, Alejandro Lira, Diana Calipse, Alejandra Barragán, Alan Camacho, Saúl Rivera, Mario, Alejandro Iván, Luis Alberto Lira, Gelber Bastos, Estefany Gómez, Moisés, Oscar Candía, Cindy Candía, Marcelino, Juan Torres, Daniel Marure, amigos de todas mis escuelas e instituciones donde pertenezco.

A los compañeros de trabajo **IPC** por enseñarme nuevas cosas en la vida laboral.

A los **conocidos** y **conocidas** con los cuales compartí momentos y situaciones malas y buenas, sobre todo porque de alguna forma contribuyeron a ser parte fundamental de un logro más.

A mi **Alma Mater** por haberme dado la oportunidad de ser parte de la máxima casa de estudios y especialmente a la **Facultad de Ingeniería** por todos los conocimientos, valores adquiridos, experiencias adquiridas dentro y fuera de sus instalaciones.

**¡Muchas Gracias!**

*Einstein siempre sostuvo que la única fuente del conocimiento era la experiencia.  
Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en  
el bello y maravilloso mundo del saber. Albert Einstein*

# **Manual teórico practico para la selección y aplicación de Fluidos de Perforación.**

## **INTRODUCCIÓN**

### **CAPITULO 1**

1. Criterios que determinan su selección
  - 1.1. Aspectos geológicos-litológicos
    - 1.1.1. Propiedades físicas de la roca
  - 1.2. Aspectos operacionales
    - 1.2.1. Tipos de perforaciones
    - 1.2.2. Tipos de formaciones inestables y su problemática

### **CAPITULO 2**

2. Fluido o lodo de perforación
  - 2.1. Clasificación de los lodos dependiendo de su medio portador
  - 2.2. Funciones básicas y propiedades básicas de los lodos
  - 2.3. Equipos de medición para evaluar sus propiedades
  - 2.4. Materiales y aditivos de uso frecuente en la elaboración de fluidos de perforación
  - 2.5. Fluidos de Perforación base agua y materiales arcillosos
  - 2.6. Clasificación de los Fluidos de perforación de acuerdo a su comportamiento reologico tixotrópico y propiedades que determinan su capacidad de acarreo y limpieza del agujero y Problemas debido a una deficiencia de selección del fluido

### **CAPITULO 3**

3. Cálculos de ingeniería para la selección y aplicación de fluidos de perforación
  - 3.1. Volumen del pozo.
  - 3.2. Capacidad de la tubería de perforación.
  - 3.3. Volumen anular
  - 3.4. Desplazamiento
  - 3.5. Velocidad Anular
  - 3.6. Tiempos de Circulación
  - 3.7. Balance de Materia
  - 3.8. Hidráulica de la Perforación

### **CAPITULO 4**

4. Manejo de seguridad de los productos químicos en los fluidos de perforación

## **CONCLUSIONES**

## **BIBLIOGRAFÍA**

---

# INTRODUCCIÓN.

---

---

## INTRODUCCIÓN.

La extracción de hidrocarburos ha requerido de constantes mejoras e innovaciones en cuanto a las técnicas y equipos utilizados, por lo que ha sido necesario, el desarrollo de recursos humanos capaces de llevar a cabo esta difícil tarea a través de la creación de diferentes disciplinas impartidas en Universidades, Institutos de Investigación y Compañías de Servicios. Las cuales han contemplado la creación de laboratorios de docencia, desarrollo e investigación para relacionar conceptos teóricos y prácticos que requieren los estudiantes de ingeniería involucrados en ciencias de la tierra necesarios.

El petróleo es el energético más importante en las ciencias de la tierra; un recurso natural no renovable que aporta el mayor porcentaje del total de la energía que se consume en el mundo.

Para tener acceso a los energéticos que contienen los yacimientos es necesario perforar la corteza terrestre y así poder construir un ducto por medio del cual se controlen y transporten los energéticos hacia la superficie, para su distribución y aprovechamiento.

Esta tarea es difícil y complicada, para llevarla a cabo se requiere de equipo, herramientas, fluidos de perforación tradicionales y especializados. Ya que de estos depende el éxito de las operaciones de perforación. Motivo por el cual se ha elaborado este manual teórico práctico con el fin de dar a conocer los parámetros que determinan la selección y aplicación de los fluidos de perforación.

---

# Capitulo 1

**Criterios que determinan su selección.**

---

---

## 1. Criterios que determinan su selección.

La selección del fluido de perforación es muchas veces un conflicto entre las opciones disponibles. Los siguientes criterios se deben considerar antes de determinar qué tipo de sistema de lodos puede ser utilizado.

### 1.1. Aspectos Geológicos – litológicos

Para atravesar la corteza terrestre y llegar al yacimiento productor de petróleo, es necesario conocer los tipos de rocas que la forman con el fin de seleccionar el sistema hidráulico y mecánico requeridos. Esta información se tiene por medio de la COLUMNA GEOLÓGICA; basada en métodos de prospección, análisis geofísicos, físicos, químicos y difractométricos a muestras procedentes de las formaciones.

ASPECTOS GEOLÓGICOS	ASPECTOS LITOLÓGICOS
Tipos de formación	Composición
Paraje solo	Arena, areniscas
Filisola, depósito Concepción	Lutita, arena
Oligoceno, eoceno, paleoceno	Arcillas compactadas lutita, illita, caolinita y clorita
Cretácico, jurásico, tithoniano	Calizas, dolomitas

### 1.1.2. Propiedades físicas de la roca

El conocimiento de las presiones de sobrecarga, poro y de fractura de las formaciones a perforar es fundamental para una óptima planeación en la perforación del pozo.

Por lo tanto, es indispensable conocer y entender los *principios físicos* que originan estas presiones y después tener la capacidad de *predecirlas* con la mayor exactitud posible. El desconocimiento o mala predicción de estas presiones ocasionan los siguientes problemas:

- ✓ Asentamientos inadecuados de las tuberías de revestimiento.
- ✓ Pegaduras de tuberías por presión diferencial.
- ✓ Pérdidas de circulación.
- ✓ Pérdida de objetivo.
- ✓ Brotes.

---

---

**Presión de Fractura (Pf).**- La presión de fracturamiento es definida como la presión requerida para mantener abierta la fractura cuando ésta empieza a cerrarse al ser suspendido el bombeo. Se le conoce también como la fuerza por unidad de área requerida para vencer la presión de formación y la resistencia de la roca. La presión de fracturamiento es conocida como la presión de tratamiento en el fondo.

## 1.2. Aspectos Operacionales

El diseño las etapas de perforación del un pozo se realizan diferentes operaciones dependiendo el tipo de pozo a desarrollar en el cual intervienen varios factores de costo beneficio los cuales son siguientes.

Etapas	Perforación
	Cementación
	Terminación
	Reparación

**Perforación:** Es la acción de penetrar los estratos de las diversas capas de roca hasta llegar a un punto establecido previamente en el yacimiento. Para tal fin se utiliza un sistema rotatorio que consiste en hacer girar una barrena conectada a una tubería para penetrar las formaciones y romper la roca. Es la única manera de saber realmente si hay petróleo en el sitio donde la investigación geológica propone que se podría localizar un depósito de hidrocarburos.

**Cementación:** Es el proceso mediante el cual se mezclan aluminatos, silicatos de calcio, arcilla, productos específicos y agua, que al bombearla al fondo del pozo, a través de la tubería de revestimiento se aísla la tubería de revestimiento y las paredes de la formación con su principal objetivo que es sellar la formación.

Con ello:

- Se evitan flujos de fluidos de la formación al pozo, entre la formación y la T.R.
- Se evita que fluidos del pozo invadan zonas no deseadas del pozo.
- Se tiene soporte en la T.R.
- Se pueden realizar operaciones como estimulaciones, disparos, pruebas de producción y cualquier otra intervención en el pozo

**Terminación:** La terminación de un pozo petrolero es el conjunto de operaciones que se realizan para comunicar la formación productora con la superficie.

**Reparación:** Cuando se cometen errores durante las etapas que comprende la estructuración del pozo que afectan la comunicación superficial con el yacimiento se procede a son las operaciones que permitan mantener la estabilidad del agujero.

---

---

### 1.2.1. Tipos de perforación

Las operaciones de perforación de pozos han cambiado debido a las formas de los yacimientos, a la nueva tecnología y al beneficio costo de cada pozo. Los tipos de perforación se pueden clasificar de la siguiente manera.

Tipos	Vertical
	Direccional
	Horizontal

**Vertical:** Es el tipo de perforación más común y consiste en establecer un conducto que una el yacimiento con la superficie.

**Direccional:** Es la ciencia de navegar los pozos desde un punto conocido por una trayectoria predeterminada a un objetivo en el subsuelo comprendiendo ángulos de desviación de 30° a 80°. Las aplicaciones más comunes son las siguientes;

- ✓ Perforar múltiples pozos partiendo de un pozo base
- ✓ Tener mayor contacto con el yacimiento productor
- ✓ Perforar pozos de alivio
- ✓ Reducción de costos
- ✓ Obtener mayor producción

**Horizontal:** Es la perforación que se realiza con un ángulo de desviación de 90° para tener un mayor contacto con el yacimiento productor y evitar la conificación del agua con el aceite.

---

---

### 1.2.2. Tipos Formaciones inestables y su problemática

La problemática de los pozos de perforación ha estado presente en el sistema mecánico e hidráulico. Algunos ejemplos mecánicos: paros de bombas por calentamiento de los motores e hidráulico: desgaste de la barrena, embolamiento de la barrena, pegadura de tubería y atrapamiento de la barrena. El cual al estudiar los tipos de formaciones y su problemática podríamos evitar con el fin de tener un óptimo desempeño en la perforación.

TIPO DE FORMACIONES	PROBLEMÁTICA
Arena no consolidada	Perdidas de circulación, derrumbes, aumento de la densidad de lodo, desgaste de barrenas y empaques de las bombas
Calizas	Fracturamiento, pérdidas de circulación
Arcillas-lutitas	Reducción de espacio anular, embolamiento, atrapamiento de la sarta, taponamiento de las cribas del equipo mecánicos separador de sólidos
Calizas con intercalaciones de lutitas y areniscas (formaciones fracturadas, conglomerados y dolomías)	Fracturamiento, pérdidas de circulación desgaste de las barrenas y daño en los motores de fondo

#### Lutitas

Son formaciones de arcillas compactadas; dependiendo del tipo y concentración de éstas se hinchan, ablandan, dispersan y fracturan al contacto con el agua generando inestabilidad del agujero.

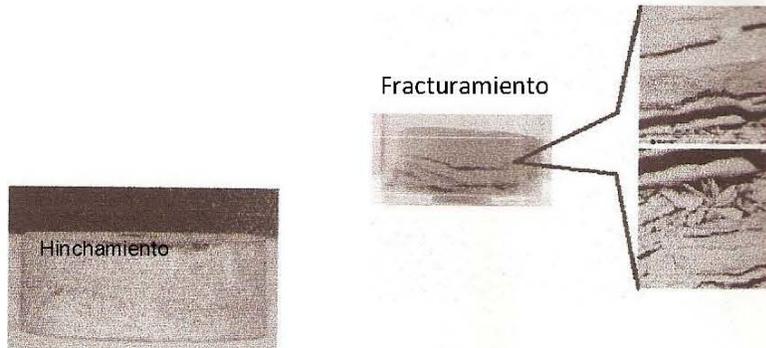
La illita, caolinita y clorita reducen la capacidad de hinchamiento de las lutitas propiciando su fracturamiento.

El grado de hinchamiento dispersión y fracturamiento dependerá de la cantidad y tipo de sales que contienen las formaciones arcillosas.

Es necesario caracterizarlas para determinar su comportamiento y poder seleccionar el fluido de perforación con las propiedades adecuadas para evitar su hidratación e inestabilidad del agujero durante la perforación.

---

## Problemas debidos a la hidratación de lutitas



## Métodos para identificar y caracterizar lutitas

Estos los podemos identificar con Registros geofísicos

El objetivo de los registros geofísicos es conocer las características y las formaciones que se van a perforar o se encuentran perforadas, tanto en su naturaleza litológica, como en su reactividad a los fluidos como el agua o hidrocarburo, es uno de los motivos de gran interés. Del conocimiento de los diferentes parámetros que proporciona esta información, dependerá la selección de los fluidos para atravesar las formaciones además de la correlación de pozos aladaños y de estudios sísmicos como:

- ✓ Registros de resistividad
- ✓ Registros acústicos
- ✓ Registros radioactivos

## Análisis físicos y químicos aplicados a núcleos y/o muestras de canal

- ✓ Difracción de rayos X
- ✓ Hinchamiento lineal
- ✓ Densidad
- ✓ Salinidad
- ✓ Intercambio cationico

---

# Capitulo 2

**FLUIDO O LODO DE PERFORACIÓN.**

---

---

## 2. FLUIDO O LODO DE PERFORACIÓN.

Son sistemas coloidales con propiedades inherentes al estado líquido y gaseoso, que conjuntamente con el equipo mecánico y las herramientas especializadas, permiten atravesar la corteza terrestre en forma controlada e ir construyendo un ducto que comunique al yacimiento productor con la superficie.

Está formado por dos fases. La *continua* que es el medio portador y la *dispersa* que está formada por partículas coloidales de naturaleza arcillosa y compuestos orgánicos e inorgánicos, los cuales le imparten las propiedades requeridas para perforar.

Dependiendo de la naturaleza arcillosa y polimérica del fluido de perforación se les puede clasificar cuando éste está estático; en suspensiones coloidales y cuando está en movimiento; como dispersiones coloidales.

Los coloides son partículas esféricas pequeñas, líquidas o sólidas insolubles dispersas en medios líquidos o gaseosos. Característica de los coloides es el hecho de que no se deposite la parte suspendida por inestabilidad de su carga eléctrica. El tamaño y la carga eléctrica de las partículas determinan los diferentes fenómenos observados con coloides, por ejemplo, en movimiento browniano. Los tamaños de los coloides están comprendidos entre  $1 \times 10^{-7}$  y  $5 \times 10^{-5}$  cm (0.001 a 0.5 micrones) de diámetro.

### 2.1. Clasificación de los lodos dependiendo de su medio portador

Fluidos base agua

Medio portador

Dulce- Salobre – Saturada de sal – agua de mar.

Fluidos base aceite

Emulsiones directas- Medio portador agua, Disperso aceite.

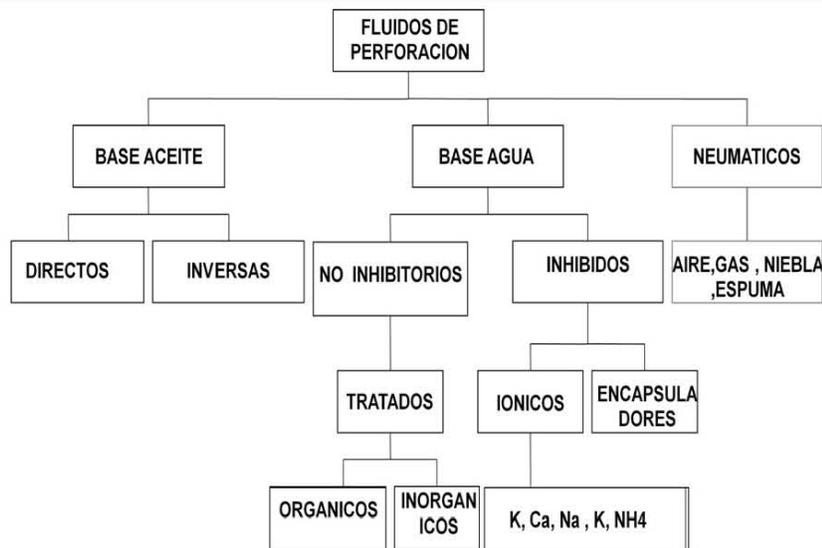
Emulsiones inversas – Medio portador aceite. Disperso salmuera.

Fluidos base aire

Fluido aereado – Medio portador lodo. Disperso aire.

Fluido espuma - Medio portador agua. Disperso aire.

Fluido niebla – Medio portador aire. Disperso agua.



## 2.2. Funciones básicas y propiedades básicas de los lodos

Estas funciones son las más importantes ya que sin una de estas no podemos llevar una perforación exitosa

- ✓ Transporte, suspensión y remoción de partículas sólidas generadas durante la perforación.
- ✓ Controlar las presiones de perforación.
- ✓ Evitar la filtración.
- ✓ Mantener estable el agujero.

Propiedades requeridas para desempeñar las funciones mencionadas

- ✓ Reológicas y tixotrópicas.
- ✓ Densidad.
- ✓ Impermeabilidad.
- ✓ Inhibición de formaciones sensibles a la hidratación.
- ✓ Neutralización de gases.

Funciones complementarias de un fluido

- ✓ Lubricar el conjunto del equipo mecánico empleado en la perforación (barrenas, sartas de perforación, bombas).
- ✓ Facilitar la cementación y la toma de registros.
- ✓ Disminución del peso de la sarta de perforación.
- ✓ Transmitir la energía hidráulica al equipo de perforación.
- ✓ Evitar la corrosión.
- ✓ No dañar el ambiente, ni al personal
- ✓ No ocasionar daño a la formación

---

---

### 2.3. Equipos de medición para evaluar sus propiedades.

#### Densidad.

La propiedad de la densidad permite controlar las presiones de las formaciones.

La densidad; es la relación que existe entre la masa y una unidad de volumen, por lo tanto es la cantidad de materia contenida en una unidad de volumen. Se expresa en  $[g/cm^3]$ ,  $[kg/m^3]$ ,  $[lb/gal]$ ,  $[lb/ft^3]$ . Las figuras 1 y 2 muestran el instrumento utilizado para determinar el valor de la densidad



Fig. 1. Balanza de lodos (escala vertical)



Fig. 2. Balanza de lodos (escala horizontal).

Las presiones de la formación se controlan por la presión hidrostática del lodo. La presión hidrostática es función de la profundidad y de la densidad del lodo.

#### Equipo de medición

##### Balanza de lodos o balanza hidrostática

##### Descripción

La balanza de lodos consiste en una taza montada en el extremo de un brazo graduado. Una cuchilla del brazo reposa sobre una base de apoyo, una pesa deslizable sobre el brazo se acerca a la cuchilla o se aleja de ella hasta balancear la taza llena de lodo. La densidad del lodo se lee directamente, figuras 1 y 2.

Se calibra con agua al no leer una densidad de  $1 g/cm^3$ , se calibra ajustando el tomillo de la balanza o la cantidad de plomo, hasta leer una densidad igual a  $1 g/cm^3$ .

##### Procedimiento:

1. Colocar el estuche de medición de la balanza para lodos en una superficie nivelada.
2. Realizar la medición en una balanza de lodos limpia y seca.
3. Llenar la copa de la balanza completamente con el lodo, eliminar todas las burbujas que están atrapadas y colocar la tapa con un movimiento giratorio, limpiar, completamente el lodo adherido en la parte externa de la copa.
4. Colocar la balanza sobre el soporte, deslizar el contrapeso, hasta lograr que la burbuja del nivel quede en equilibrio en la línea central.
5. Tomar la lectura en la parte del contrapeso que da hacia la cuchilla. Y anotar el dato.

---

6. El dato obtenido es el valor de la densidad en  $\text{g/cm}^3$ .

Un peso excesivo del lodo puede fracturar la formación y ocasionar pérdidas parciales ó totales de nuestro fluido. Para incrementar la densidad del fluido de perforación se adiciona barita, ó cualquier otro material densificante, la barita es un material inerte que no fomara parte de las reacciones químicas en nuestro fluido

La densidad en fluidos de perforación se determina por el método de la balanza. Y es muy importante porque sirve para controlar la presión del pozo, ajustándose ligeramente por encima de la presión de la formación, evitando así la entrada de fluidos ajenos a nuestro sistema, pero si esta densidad es excesiva puede fracturar la formación e inducir una pérdida parcial o total de nuestro fluido.

**Viscosidad Marsh.**

Es la medida de la resistencia interna de los líquidos o de los gases al flujo, se reporta en segundos Marsh.



Fig. 3. Embudo Marsh, jarras de plástico y de Acero inoxidable.

**Equipo de medición Embudo Marsh**

1. Embudo Marsh con tamiz fijo malla 12.
2. Jarra Marsh de al menos un litro de capacidad (graduada).
3. Cronómetro.

Las especificaciones del embudo Marsh son las siguientes:

1. Cono del embudo  
Longitud.....12.0 " (305 mm)  
Diámetro .....6.0 " (152 mm)  
Capacidad hasta el nivel de la malla.....1.5 [Its]
2. Orificio  
Longitud.....2.0 " (50.8 mm)  
Diámetro interior .....3/16 " (4.7 mm)
3. Tamiz.....malla 12  
Con aberturas de 1/16 " (1.6 mm) a un nivel de 3/4 " (19 mm) por debajo del extremo superior del embudo.

---

---

**Procedimiento:**

1. Cubra el orificio del embudo con un dedo y vierta el fluido de perforación a través del tamiz en el embudo limpio. Llene hasta que el fluido toque del tamiz.
2. Remueva el dedo que cubre el orificio, al mismo tiempo accione el cronómetro. Medir el tiempo que tarda el fluido en llenar el vaso graduado hasta la marca de un cuarto de galón 946 [cm<sup>3</sup>] ó 1 [lt]
3. Registrar el tiempo redondeando al segundo más cercano como viscosidad del embudo Marsh.
4. Reportar el tiempo en segundos como viscosidad al embudo Marsh en [seg/lts] ó [seg/ga].

Entre mayor sea la resistencia a fluir mayor será la viscosidad.

Con esta propiedad se facilita ó se dificulta el bombeo del fluido, así como la capacidad de acarrear los recortes hacia la superficie aunque las mediciones marsh están influenciadas por la velocidad de gel y por la densidad del lodo.

Viscosidad excesiva da como resultado la siguiente problemática:

- ✓ Incremento en la presión de la bomba
- ✓ Aumento en el riesgo de suaveo / surgencia del agujero
- ✓ Pérdida de lodo en las temblorinas por poca eficiencia en el equipo de control de sólidos.
- ✓ Aumenta el riesgo de fracturar la formación, especialmente con esfuerzos de gel altos
- ✓ Eliminación deficiente de lodos en la operación de cementación.

Viscosidad baja da como resultado la siguiente problemática:

- ✓ Limpieza deficiente del estrato de recortes (por lo tanto, relleno del agujero, obstrucción de la sarta y degradación de los recortes)
- ✓ Sobrecarga del espacio anular que incrementa la presión hidrostática.
- ✓ Aumenta la erosión si el fluido esta en flujo turbulento
- ✓ Asentamiento de la barita y recortes

La viscosidad del agua es de 27 [seg/lts] a 21+/- 3 °C

**Reología y Tixotropía.**

La reología es la ciencia que se ocupa del estudio del comportamiento y deformaciones de la materia sometida a esfuerzos externos. La medición de las propiedades reológicas de un lodo es importante para calcular las pérdidas de presión por fricción y para determinar la capacidad del lodo para transportar los recortes hasta la superficie.

Las propiedades reológicas y tixotrópicas fundamentales son la viscosidad y la resistencia gel. Se obtiene una mejor medición de las características reológicas mediante el empleo de un viscosímetro rotatorio de lectura directa y de cilindros concéntricos. El viscosímetro provee dos lecturas que se convierten fácilmente en los dos parámetros reológicos y tixotrópicos: viscosidad plástica y punto de cedencia. Para la viscosidad plástica la unidad utilizada es el centipoise o pascal, se trata de una parte de la resistencia al flujo de lodo, causada principalmente por la fricción entre las partículas suspendidas y también por la viscosidad de fase continua o medio portador.

---

---

La viscosidad plástica es afectada por la concentración, tamaño y forma de las partículas sólidas suspendidas en el lodo. En otras palabras mide la cantidad de sólidos contenidos en nuestro fluido, la fricción mecánica entre las moléculas; Su control mejora el comportamiento reológico en lodos de alto y bajo peso y mejora la tasa de penetración. Para el punto de cedencia se usan como unidades las libras por 100 pies cuadrados (lb/100 ft<sup>2</sup>). El punto de cedencia es la parte de la resistencia al flujo causada por las fuerzas de atracción entre partículas; esta fuerza atractiva es a su vez causada por las fuerzas sobre la superficie de las partículas dispersas en la fase fluida del lodo.

El punto de cedencia determina la capacidad de acarreo del recorte y limpieza del pozo, esta es causada por la fuerza de atracción electroquímica que tienen las partículas sólidas en estado dinámico. Se dice que el punto de cedencia es causado por el contaminante Ca<sup>++</sup>, CO<sub>3</sub> y sólidos arcillosos de la formación, el descontrol de esta propiedad puede ocasionar la floculación del lodo y será necesario aplicar dispersantes en medio alcalino.

El viscosímetro rotatorio se emplea también para determinar las características tixotrópicas de los lodos, es decir, para medir su capacidad de desarrollar una estructura de gel rígida o semi-rígida durante periodos de reposo. Se hacen para ello dos mediciones de resistencia de gel después de 10 seg y de 10 minutos de reposo.

Se ha determinado que los valores en campo de viscosidad a baja velocidad de corte (6 y 3 rpm.) Tienen un mayor impacto sobre la limpieza del pozo que el punto cedente, además de proporcionar la suspensión de la barita bajo condiciones dinámicas como estáticas. Una regla general en el campo consiste en mantener el valor a 3 [rpm] de manera que sea mayor que el tamaño del pozo (expresado en pulgadas) en los pozos de alto ángulo.

$$\gamma = (2 * \text{Lectura 3 rpm}) - \text{Lectura 6 rpm}$$

Donde:

$\gamma$  = punto de cedencia

Los mejores indicadores en el campo de la viscosidad a baja velocidad de corte son las lecturas 6 y 3 rpm. Y estas deben ser iguales ó mayores del diámetro de la barrena en pulgadas, generalmente partículas intactas son más fáciles de transportar, que los recortes hidratados y pegajosos.

Los pozos desviados entre 30 y 50 ° son los más difíciles y es necesario programar constantemente limpiezas de agujero y mantener el punto de cedencia alto

La tensión superficial es la fuerza de atracción en la interfase entre líquido y su vapor, se tiene que mantener el área de esa superficie al mínimo.

Los geles son la propiedad de la tixotropía, y se refiere a que el lodo en estado estático se comporta como un gel y en estado dinámico se comporta como fluido, y su función es que cuando el lodo está en estado estático suspenda los recortes de la formación y por lo tanto estos no se precipiten al fondo, atrapando la sarta, pero que en estado dinámico los geles sean lo suficientemente bajos que permitan que la arena y recortes sean separados en la superficie y no los retengan, para que las bombas trabajen adecuadamente, pero también deben ser lo

---

---

suficientemente altas para permitir la suspensión de la barita y de los sólidos adicionados intencionalmente.

Existen varios tipos de geles:

Geles progresivos: Son cuando la diferencia entre la lectura de gel a los 10[seg] y la de 10[min] son ambos amplios e indican acumulación de sólidos. Valores bajos a intermedios a 10[seg] aumentando rápidamente a 10[min]: 3/20; 6/35; 8/50.

Geles planas: cuando la lectura de gel de 10[seg] y la de 10[min] son altas pero casi no hay diferencia entre ellas: 13/15; 20/21; 30/32.

Geles frágiles: Valores bajos casi idénticos: 1/1; 2/2; 2/3.

Geles Favorables: Lecturas bajas a intermedias a 10 [seg] que pasan a valores intermedios a 10 [min]: 2/4; 3/6; 4/8.

Equipo:

1. Viscosímetro de lectura directa a 115 volts, de seis velocidades 3, 6, 100, 200, 300, 600 rpm. Mod. Fann 35 A
2. Pocillo metálico
3. Chaqueta de calentamiento la temperatura depende del tipo de fluido
4. Termómetro metálico

Especificaciones para el viscosímetro de indicación directa.

1. Manga del rotor.  
Diámetro interior..... 1.450 " (36.83 mm)  
Longitud total..... 3.425 " (87.00 mm)  
Línea grabada ..... 2.30 " (58.40 mm)  
Dos líneas de agujeros, de 1/8 de pulgada (3.18 mm) y espaciados 120° (2.09 rad), están alrededor de la camisa rotatoria, apenas por debajo de la línea marcada.
2. Cilindro interior.  
Diámetro.....1.358 " (43.49 mm).  
Longitud del cilindro.....1.496 " (38.00 mm).  
El cilindro interior es cerrado con una base plana y una tapa cónica.
3. Constante de torsión del resorte.  
386 dinas-cm. /grados de deflexión.

Velocidades del rotor.

Alta velocidad.....600 rpm.  
Baja velocidad.....300 rpm.



Fig. 4. Viscosímetro de indicación directa típico.

Procedimiento:

1. Colocar una muestra del fluido de perforación en un vaso de viscosímetro termo estáticamente controlado. Dejar suficiente volumen vacío para el desplazamiento de la lenteja del viscosímetro y la manga. La lenteja y la manga desplazaran aproximadamente  $100 \text{ cm}^3$  del fluido de perforación. Sumergir la manga de la báscula exactamente hasta la línea marcada. Las medidas tomadas en este campo se deben hacer con un mínimo de retraso con respecto al momento de la prueba. La prueba se debe hacer a  $120^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{ [F]}$  ( $50^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ [C]}$ ) para fluidos base agua ó a  $150^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{ [F]}$  ( $65^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ [C]}$ ). Para lodos base aceite, el lugar de la prueba debe quedar registrado en el informe.
2. Calentar o enfriar la muestra hasta lograr la temperatura seleccionada. Se debe utilizar un corte intermitente o constante a una velocidad de 600 [rpm]. Para agitar la muestra mientras se calienta o enfría a fin de obtener una temperatura uniforme de la muestra. Una vez que el vaso ha alcanzado la temperatura seleccionada, sumergir un termómetro en la muestra y continuar agitando hasta que la muestra alcance la temperatura seleccionada. Registre la temperatura de la muestra.
3. Utilizar una velocidad de rotación de la manga a 600 [rpm]. Esperar hasta que la lectura del dial alcance un valor estable (el tiempo requerido para esto varía según las características del fluido). Registrar la lectura.
4. Pasar a una velocidad de rotación de la manga de 300 [rpm], esperar hasta que la lectura del dial alcance un valor estable. Registrar la lectura para 300 [rpm].
5. Agitar la muestra de lodo de perforación por un lapso de 10 [seg]. A alta velocidad.
6. Permita que el lodo repose por 10 [seg]. Manera máxima, gire el volante en la dirección que permita obtener una lectura positiva del dial. La lectura máxima es la fuerza de gel inicial. Para instrumentos de 3 [rpm] de velocidad, la lectura máxima que se obtiene luego de una rotación de 3 [rpm]. Es la fuerza de gel inicial. Registrar la fuerza de gel inicial (para 10 [seg]) en  $[\text{lb}/100 \text{ ft}^2]$  ó  $[\text{Pa}]$ .

- 
- 
7. Volver a agitar el lodo a alta velocidad durante un período de 10 [seg]. Y luego permita que repose por 10 minutos. Repita la medición como lo indica el punto anterior y registre la lectura máxima como 10 minutos gel en [lb/100 ft<sup>2</sup>] ó [Pa].

Cálculos:

Viscosidad aparente  $V_a = \text{Lectura. } 600/2 \text{ [cps]}$   
Viscosidad plástica  $V_p = \text{Lectura. } 600 - \text{lect. } 300 \text{ [cps]}$   
Punto de cedencia  $P_c = \text{Lectura. } 300 - V_p \text{ [lb/100 ft}^2\text{]}$   
Gel a 0 min.  $= \text{Lectura a } 3 \text{ rpm. [lb/100 ft}^2\text{]}$   
Gel a 10 min.  $= \text{Lectura a } 3 \text{ rpm. [lb/100 ft}^2\text{]}$

#### Potencial Hidrógeno pH.

Indica el grado de acidez o alcalinidad. En la escala de pH el rango de acidez varía de 1 hasta 7 (en acidez decreciente) y el rango de alcalinidad comienza de 7 hasta llegar a 14 (en alcalinidad creciente). Un pH de 7 es neutro. Los lodos son casi siempre alcalinos, un rango habitual de pH es de 9.0 a 10.5, sin embargo, pueden encontrarse lodos de pH más altos entre 12.5 hasta 13. El pH de los lodos afecta la dispersión de las arcillas, la solubilidad de varios productos y sustancias químicas y las propiedades reológicas y tixotrópicas del fluido.

Hay dos métodos principales para determinar el pH:

Método colorimétrico.  
Método potenciométrico.

Método colorimétrico.- el papel de prueba para determinar pH está saturado con un colorante cuyo color depende grado de acidez o alcalinidad de la solución que está siendo probada. El papel de prueba tiene un rango de acuerdo a la alcalinidad, cuenta con un código de colores para comparar y hacer la estimación del valor de esta propiedad.

Equipo:

1. Papel indicador (rango 0-14)

Procedimiento:

1. Desprenda del rollo una tira de papel de prueba y colócala sobre la superficie de la muestra del lodo permitiendo que se humedezca.
2. Permitir que el papel este sobre la superficie hasta que el cambio de color se ha estabilizado.
3. Una vez que el color se ha estabilizado, comparar el color del papel con el color de la tabla suministrada y determinar el pH.
4. Registrar el pH del lodo dependiendo de la escala de la tabla de colores para el papel indicador utilizado.

#### Filtrado Baja Presión y Temperatura.

La medición del volumen de filtrado y espesor del enjarre de un lodo son propiedades fundamentales para el control y tratamiento de un fluido de perforación así como también las características del filtrado (análisis) y condiciones del filtrado; baja y alta presión y temperatura.

---

Estas propiedades son afectadas por el tipo y cantidad de sólidos en el lodo y sus interacciones fisicoquímicas los cuales se ven afectados por la temperatura y la presión baja.

Equipo:

1. Equipo completo de filtro prensa.
2. Medio filtrante (filtro whatman #50 o equivalente).
3. Cronómetro de 60 minutos de intervalo.
4. Probeta graduada de 10 ml, graduaciones de 0.2 ml
5. Cápsulas CO<sub>2</sub>.



Fig. 5. Filtro Prensa.

Procedimiento:

1. Obtener una muestra de fluido recientemente agitado.
2. Asegúrese que cada parte de la celda este limpia y seca, que los empaques no estén deformados.
3. Ensambla las piezas de la celda, base, malla, empaque, papel filtro y apriete firmemente.
4. Llena con lodo, previamente colado del embudo hasta 2 cm., abajo del borde superior de la celda, coloque la tapa y apriétela con el tornillo del marco.
5. Coloca una probeta graduada del volumen adecuado bajo la descarga de la celda para recibir el filtrado.
6. Procede a cerrar la válvula reguladora y ajuste la presión de trabajo hasta obtener 7 kg/cm<sup>2</sup> o 100 psi, misma que deberá aplicarse durante 30 min.
7. Lea el volumen recuperado y repórtelo en ml.
8. Abra la válvula del regulador y abra la válvula de descarga y cuando el manómetro marque 0, saque la celda del marco y desarme la misma, recuperando el enjarre, enjuáguelo con agua, reporte consistencia, fragilidad y espesor en milímetros.

#### Filtrado Alta Presión y Alta Temperatura.

Equipo:

1. El filtro prensa de alta presión y alta temperatura (APAT) consiste en una fuente de presión controlada (CO<sub>2</sub> ó N<sub>2</sub>), una celda de lodo diseñada para una presión de trabajo de 600 a

---

---

1300[PSI], un sistema de calentamiento de la celda y una cámara de recolección presurizada para prevenir la evaporación del filtrado y finalmente una base adecuada.

2. Medio filtrante:

3. Para temperaturas hasta 204°C (400°F) use papel Wathman No.50 ó equivalente.

4. Para temperaturas mayores de 204°C use un disco de acero inoxidable poroso (Dynalloy X-5 ó equivalente)

5. Cronometro para un intervalo de 30[min]

6. Termómetro bimetalico.

7. Probeta graduada: 25 o 50 [cm<sup>3</sup>]

8. Mezclador de alta velocidad (Multimixer o Hamilton Beach).

Procedimiento para temperaturas de 150 °C] (300 °F] ó menos:

1. Coloque el termómetro en el termopozo y precaliente a 10°F] arriba de la temperatura de prueba seleccionada. Ajuste el termostato en la posición adecuada para mantener la temperatura deseada.
2. Agite la muestra de lodo durante 10 [min] en el mezclador de alta velocidad. Prepare la celda con papel filtro y llénela con el lodo teniendo cuidado de no llenar más arriba de 1/2" (1.3 [cm]) de la parte superior para permitir la expansión del fluido.
3. Coloque la celda en la chaqueta de calentamiento con ambas válvulas cerradas (superior e inferior) y el termómetro en el termopozo de la celda.
4. Conecte la unidad de presión sobre la válvula superior de la celda y coloque el seguro (pasador).
5. Conecte la cámara de contrapresión sobre la válvula inferior de la celda y coloque el seguro.
6. Mantenga las válvulas cerradas y aplique 100[PSI](7.03 [kg/cm<sup>2</sup>])a ambas unidades de presión. Abra la válvula superior y aplique 100[PSI] al lodo, manteniéndola hasta que se establezca la temperatura deseada. El tiempo de calentamiento no debe exceder de una hora.
7. Cuando la muestra alcance la temperatura de prueba incremente la presión en la parte superior a 600 [PSI] (42.18 [kg/cm<sup>2</sup>]) y abra la válvula inferior para iniciar la filtración. Recolecte el filtrado durante 30 [min], manteniendo la temperatura seleccionada dentro de  $\pm 3$  °C] ( $\pm 5$  °F]). Si la contrapresión se incrementa arriba de 100 [PSI] durante la prueba, cuidadosamente reduzca la presión purgando una porción del filtrado.
8. Registre el volumen total, temperatura, presión y tiempo. El volumen del filtrado es correcto para un área de filtración 7.1 [pulg<sup>2</sup>] (45.8 [cm<sup>2</sup>]). Si el área de filtración es de 3.5 [pulg<sup>2</sup>] (22.58 [cm<sup>2</sup>]) reporte el doble del volumen del filtrado.
9. Al final de la prueba cierre ambas válvulas de la celda y los reguladores de presión.
10. Retire la celda de la chaqueta de calentamiento. Descargue el lodo, mida y reporte el enjarre con aproximación de 8 [mm]

La presión en el interior de la celda es aun aproximadamente de 500 [PSI] (35 [kg/cm<sup>2</sup>]). Mantenga la celda en posición vertical y deje enfriar a temperatura ambiente antes de desensamblar.

El filtrado ó la filtración es la pérdida del fluido de control hacia la formación, y está puede ser contrarestanda mediante la formación de un buen enjarre que debe ser impermeable, flexible, delgado y consistente. El enjarre además proporciona soporte a las paredes del pozo, evitando derrumbes.

---

Altas velocidades de filtrado producen efectos indeseables en la formación, que van desde la hidratación de las lutitas, hasta la fricción en el agujero, para disminuir la filtración depende principalmente de los componentes sólidos o coloides, que forman la capa delgada llamada enjarre, un coloide es un sólido que se dispersa en un fluido en partículas muy pequeñas, porque un enjarre grueso restringe el paso de la herramienta y permite que exista una alta cantidad de filtrado hacia la formación, puede ocasionar derrumbes y dificultad en la introducción de la TR, ó el efecto de succión.

El enjarre es la cantidad de sólidos correspondientes al volumen de filtrado, a mayor filtrado mayor enjarre, esto indica los sólidos que se adhieren a las paredes del pozo y disminuye su permeabilidad.

Las variables que afectan al enjarre y ocasiona un volumen de filtrado alto son el tiempo, temperatura, presión y características de los sólidos.

#### **Contenido de arena.**

Por definición, la arena comprende partículas mayores a la malla 200 (74 micrones) si estas partículas, efectivamente son arena, por definición geológica (cuarzo y sílice) son altamente abrasivas.

Para la determinación del contenido de arenas se cuenta con el eleúteometro que está constituido por un cedazo de un diámetro de 6.35 cm. Con una malla No. 200, un embudo que se ensambla en el cedazo y un recipiente de vidrio con una escala de 0 hasta 20. El porcentaje de arena se lee directamente en el recipiente de vidrio.

La arena en el lodo de perforación origina desgaste en las partes metálicas por abrasividad.

Equipo:



Fig. 6. Contenido de arena

El equipo siguiente se usa para medir el contenido de arena en el lodo:

1. Malla 200, 2.5 pulg. (63.5 mm) de diámetro.
2. Embudo para colocar la malla.

- 
- 
3. Tubo graduado de cristal para medir el volumen de lodo que se agregará. El tubo esta graduado de 0 a 20 % para leer el porcentaje de arena directamente.

Procedimiento:

1. Llene el tubo para la determinación del contenido de arena con lodo, hasta la marca indicada. Agregue agua hasta la siguiente marca. Tape la boca del tubo con su pulgar y agite vigorosamente.
2. Vuelque la mezcla sobre la malla limpia y seca. Deseche el líquido que paso a través de la malla. Agregue más agua al tubo, agítelo y nuevamente vuélquelo sobre la malla. Repita hasta que el agua que pasa por la malla aparezca limpia. Lave la arena retenida sobre la malla, para liberarla de cualquier remanente de lodo.
3. Coloque el embudo con la parte de abajo hacia arriba, sobre la parte superior del receptáculo de la malla. Lentamente, invierta la posición de este ensamble e inserte la punta del embudo dentro de la boca del tubo de vidrio graduado. Lave la arena que se encuentra sobre la malla, la cual hará que la misma penetre dentro del tubo, usando un fino spray de agua a través del lado posterior de la malla (golpee sobre los lados de la malla con el mango de una espátula, para facilitar este proceso). Permita que sedimente la arena, y a partir de la graduación que tiene el tubo lea el porcentaje volumétrico de arena.
4. Reporte el contenido de arena del fluido de perforación en porcentaje volumétrico (%). Reporte también la zona de la cual obtuvo la muestra de lodo: arriba o abajo de la zaranda, pileta de succión, etc. Los sólidos gruesos, diferentes a la arena, como por ejemplo el material de pérdida de circulación o la barita gruesa, serán retenidos también sobre la malla, y la presencia de estos sólidos debería ser tomada en cuenta.

La arena en exceso en un fluido de perforación puede provocar el depósito de un enjarre grueso en la pared del agujero ó puede asentarse en el agujero alrededor de la herramienta, y cuando la circulación es detenida ocasionar fricción y abrasión, por lo tanto desgaste en las partes mecánicas de las bombas y conexiones, la arena como el cemento son sólidos indeseables, y afectan directamente la viscosidad plástica y el acarreo del recorte. El método de determinación es el llamado de cernido, y se expresa en % por volumen del lodo.

#### **Contenido de sólidos.**

El contenido en sólidos afecta la mayor parte de las propiedades del lodo de perforación, incluyendo la densidad, la viscosidad, la resistencia de gel, la perdida por filtración y la estabilidad a la temperatura,.

Una muestra de lodo de perforación se coloca en una cámara de acero de un volumen determinado y se calienta, vaporizando los componentes líquidos. Los vapores pasan a través de una unidad de condensación y el líquido es recolectado en una probeta graduada de 0-10 en por ciento. El volumen del líquido se mide en [ml] y todos los sólidos ya sean los suspendidos o los disueltos, se determinan por diferencia. Para determinar la cantidad de sólidos y líquidos en un lodo de perforación se requiere el uso de la retorta.

Equipo:

1. Retorta de 10 o 20 [ml]. Que consta la celda, condensador, elemento de calentamiento, control de temperatura. ( $500\text{ [}^{\circ}\text{C]} \pm 20\text{ [}^{\circ}\text{C]}$ ).
2. Probeta graduada de 0-10 [ml] ó 0-20 [ml].
3. Espátula de limpieza.
4. Fibra de acero.



Fig. 7. Retorta para determinar sólidos, aceites y agua.

#### Procedimiento

1. Asegurarse que la celda de acero, el condensador y la probeta estén limpios, secos y fríos antes de usarse.
2. Recolectar una muestra representativa del lodo.
3. Llenar lentamente la celda con lodo hasta su nivel máximo evitando introducir aire, coloque la tapa de la celda, dando ligeros golpecitos y gírela para que desaloje las burbujas que se encuentren en el lodo y así hacer una buena determinación.
4. Proceda a limpiar con un trapo todo el exceso de lodo que quede en el contorno de la celda y rosca, lubrique y enrosque firmemente al elemento de separación manera que no haya fuga. Esta debe estar empacada con fibra metálica suficiente para que la tapa de la celda no se mueva y pueda derramarse el lodo contenida en ella.
5. Proceda a colocar una probeta de 10 ml limpia y perfectamente seca, en la parte inferior del condensador para recibir ahí el destilado.
6. Encienda la retorta. Permita que transcurran mínimo 45 minutos.
7. Proceda a leer el resultado de la siguiente manera:

Vol. de agua.- Es la porción líquida cristalina recolectada en la probeta.

Vol. de sólidos.- Se calcula restando del volumen total de la probeta menos la cantidad de agua recolectada

#### **Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).**

El MBT ó prueba del azul de metileno, nos permite saber los kilogramos de bentonita ó arcilla que hay por metro cúbico en el lodo. (La bentonita no es la única sustancia que absorbe al azul de metileno y él peróxido de hidrógeno tiene como objeto eliminar el efecto de materiales orgánicos tales como lignosulfonatos, lignitos, polímeros poliacrilatos etc. Y permite estimar el contenido de arcilla sin interferencia de otros materiales absorbentes.)

La capacidad de intercambio catiónico de los lodos de perforación, es un indicador de la cantidad de arcilla reactiva (bentonita y/o sólidos de perforación) presente y se determina por la prueba de azul de metileno (MBT), las capacidades del azul de metileno y de intercambio catiónico no son necesariamente equivalentes esto depende de la cantidad de fluido utilizado, la primera será un poco menor que la capacidad de intercambio catiónico.

---

Equipo:



Fig. 8. Kit de azul de metileno.

1. Solución de azul de metileno: 3.20 gramos de azul de metileno grado reactivo ( $C_{16}H_{18}N_3SCl$ ) / Lt; (1 [cm<sup>3</sup>]= 0.01 miliequivalente).

Nota: la humedad contenida en el azul de metileno grado reactivo debe ser determinado cada vez que la solución se prepara. Seque una porción de 1.0 gramo de azul de metileno a peso constante a 200°F ± 5°F (93 °C ± 3°C). efectue las correcciones apropiadas en el peso de azul de metileno que se usara en la preparación de la solución de azul de metileno como sigue:

$$\text{Peso de la muestra a tomar para la solución} = \frac{3.20}{\text{Peso de la muestra seca}}$$

Reactivos:

1. Peróxido de hidrógeno: solución al 3 %.
2. Ácido sulfúrico diluido: aproximadamente 5 N.
3. Jeringa graduada: 2.5 [ml] ó 3 [ml].
4. Matraz Erlenmeyer: 250 [ml].
5. Bureta graduada: 10 [ml], micro pipeta: 0.5 [ml] ó pipeta graduada: 1[ml].
6. Cilindro graduado: 50 [ml].
7. Varilla de agitación.
8. Parrilla de calentamiento con agitación magnética.
9. Papel filtro Whatman # 1, o equivalente.
10. Agua destilada.

Procedimiento:

1. Agregar 1[ml] de lodo en el matraz Erlenmeyer ó el volumen adecuado de lodo para utilizar entre 2 y 10 [ml] de reactivo.
2. Añadir 10 [ml] de agua destilada.
3. Agregar 15 [ml] de peróxido de hidrógeno al 3%
4. Agregar 0.5 [ml] de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (5N), y agitar vigorosamente.
5. Posteriormente se procede al calentamiento, alcanzando su punto de ebullición, permita la ebullición durante 10 minutos.

6. Pasado este tiempo se retira del calentamiento y se aumenta el volumen a 50 [ml] con agua destilada, permitir que la muestra se enfríe.
7. Posteriormente se agrega 1[ml] de azul de metileno, agitar por 30 segundos.
8. Tomar una muestra (gota) con una varilla de vidrio y aplicar en forma de gota sobre el papel filtro, observar si se forma un anillo azul- verdoso sobre la gota marcada, si no, se agrega en porciones de 0.5 [ml] de azul de metileno a la mezcla tantas veces como sea necesario hasta que aparezca bien definido el anillo azul-verdoso que identifica el punto final de la titulación.
9. El intercambio catiónico del lodo debe registrarse como la capacidad de azul de metileno.

Cálculos

$$MBT = ([ml] \text{ de azul de metileno gastado}) * 14.25 = [kg/m^3]$$

#### 2.4. Materiales y aditivos de uso frecuente en la elaboración de fluidos de perforación

Material o Ingrediente cualquiera de las sustancias sólidas, líquidas o gaseosas requeridas para formular un sistema específico. se utiliza en cantidades considerables

Aditivo- Sustancia que en pequeñas cantidades se añade a la formulacion para mejorar propiedades especificas de la misma.

MATERIALES		
Líquidos	Sólidos	Gases
Agua	Arcilla Hidratable. Bentonita	Nitrógeno
Agua dulce	Hidrofoba. Barita	Aire
Agua salobre	Sales solubles. KCl, CaCl <sub>2</sub> , MgCl <sub>2</sub> , NaCl	
Salmuera	Sales insolubles, CaCO <sub>3</sub> , FeCO <sub>3</sub> , MgCO <sub>3</sub>	
Agua de Mar	Polimeros solubles. CMC. HEC y PHPA	
Aceite	Almidones,	
Diesel	Goma xantana	
Aceite mineral		
Aceite sintético		

ADITIVOS	FUNCIONES
Bentonita	Viscosificante, gelante.
Barita	Densificante
Arcilla organofílica	Viscosidad, gelatinosidad en medios oleosos
Polímeros, CMC, HEC, PHPA, almidón, lignitos y complejos fenólicos, lignosulfonatos y taninos.	Los polímeros dependiendo de su grado de polimerización tienen las funciones siguientes: viscosifican, dispersan, reducen la filtración y lubrican.
Asfaltos sulfonados y gilsonita modificada	Reductores de filtración. Dispersantes.
Sales solubles, NaCl, KCl, CaCl <sub>2</sub>	Inhiben la hidratación de formaciones problemáticas. Imparten densidad a medios acuosos.
Sales insolubles CaCO <sub>3</sub> , MgCO <sub>3</sub> , FeCO <sub>3</sub>	Densificantes.
Dispersantes	Evitan la floculación de partículas coloidales
Emulsificantes	Permiten la dispersión del aceite en el agua o viceversa.
Alcalinizantes	Neutralizan la presencia de gases ácidos.
Reductores de filtrado	Evitan la pérdida de agua o aceite.
Lubricantes	Evitan la fricción.
Inhibidores de corrosión	Disminuyen la corrosión.
Antiespumantes	Eliminar la presencia de aire.
Indicadores de pH	Indican el grado de acidez o alcalinidad.

Nota.- Las arcillas, polímeros, sales insolubles y aditivos sólidos deben estar finamente pulverizados. En el caso de sales solubles deben estar en forma de escamas o gránulos pequeños. Los aceites deben tener alto punto de ignición. Los gases no deben ser explosivos ni inflamables.

### 2.5. Fluidos de Perforación base agua y materiales arcillosos

El objetivo es conocer las condiciones necesarias para elaborar un fluido de perforación que cumpla con las propiedades requeridas para perforar y evaluar las propiedades de ese fluido.

Equipo escala laboratorio para la elaboración del fluido

Mezclador o dispersor

Materiales

Agua  
Arcillas, bentonita y barita  
Sosa (NaOH)  
CMC

---

---

### Mediciones

- ✓ Densidad
- ✓ Viscosidad
- ✓ Reología, tixotropía
- ✓ Filtración
- ✓ Alcalinidad

Nota: Se aplicaran las ecuaciones que rigen el balance de materia para dar densidad al lodo, incrementarla o bajarla.

### Contaminantes y tratamientos

Durante la perforación los lodos o fluidos están expuestos a la acción de algunos agentes contaminantes, razón por la cual, previamente a su aplicación deben analizarse las formaciones y sus problemáticas para seleccionar los fluidos que inhiban los contaminantes causantes de los problemas, así como el tipo de tratamiento que debe emplearse para minimizar el daño al fluido de perforación a emplearse. Un contaminante es una sustancia o medio que causa inestabilidad a un sistema establecido. Los contaminantes más comunes y agresivos van desde los componentes que integran las formaciones y los procedentes del tipo de operaciones que se realizan.

### Factores que afectan seriamente la contaminación

Tipo de contaminante  
Concentración de contaminantes.  
Tamaño de partículas sólidas procedentes de las formaciones.  
Eficiencia del equipo mecánico eliminador de sólidos.

### Contaminantes procedentes de las formaciones

Arena  
Anhidrita.  
Yeso.  
Lutitas hidratables y o deleznable.  
Sales, Calcio (Ca)<sup>++</sup> y magnesio (Mg)<sup>++</sup>.  
Flujos de gases. Ácido Sulfhídrico, Bióxido de carbono, Metano.  
Agua salada.

### Contaminantes debidos a operaciones que se realizan

Cementaciones defectuosas, cemento no fraguado.  
Uso de salmueras  
Perforaciones altamente desviadas.

### Efectos

Incremento de la filtración  
Aumento de propiedades tixotrópicas debido al pH  
Disminución de propiedades reológicas.

Disminución o aumento de la densidad.  
 Separación de fases.  
 Perdidas de circulación.  
 Derrumbes.  
 Disminución del diámetro de agujero.  
 Asentamiento de sólidos densificantes y procedentes de las formaciones.

**Problemas**

Atrapamiento de la sarta de perforación.  
 Embolamiento de la barrena.  
 Corrosión.  
 Incrustaciones.  
 Incremento notable de los costos de perforación.  
 Caso extremo abandono o pérdida del pozo.

**Tratamientos recomendados.**

CONTAMINANTE	TRATAMIENTO
Gases acidos	Empleo de alcalinizantes divalentes: dióxido de calcio o productos secuestrantes.
Flujo de agua salada	Adición de aditivos viscosificantes y gelantes compatibles con la salinidad y material densificante.
Incremento de sólidos	Eliminación por medio del equipo mecánico y adición de agentes dispersantes.
Filtración	Adicionar aditivos reductores de filtrado de acuerdo al tipo de lodos que se está empleando.
Formaciones sensibles al hinchamiento o derrumbe: lutitas hidratables y /o deleznales.	Encapsulamiento o control de presión osmótica.
Cemento	Eliminación del ión calcio mediante la soda ash (carbonato de sodio)
Agentes oxidantes	Empleo de agentes secuestrante de oxígeno como el bisulfito de sodio.
Presencia de iones calcio Ca y magnesio Mg en presencia de oxígeno y altas temperaturas	Empleo de aditivos formadores de películas repelentes. Aceites no polares.
Espumas	Antiespumantes.

Equipos mecánicos recomendados para eliminar sólidos y gases contaminantes procedentes de las formaciones que se están perforando

---

---

### Control de sólidos.

Una de las funciones primarias de un fluido de perforación es transportar a la superficie los sólidos perforados conforme se construye el pozo. Estos sólidos son contaminantes y, si se dejan en el sistema, pueden causar numerosos problemas en las operaciones. Existen tres maneras de controlar la acumulación de sólidos perforados para mantener las propiedades aceptables del fluido de perforación:

- I. Dejar que se acumulen los sólidos y desechar el fluido cuando haya perdido su utilidad; preparar un fluido nuevo y fresco.
- II. Diluir los sólidos y reacondicionar el sistema para mantener las propiedades del fluido dentro de un nivel aceptable. Eliminando cualquier exceso de fluido.
- III. Retirar los sólidos perforados para reducir al máximo la dilución necesaria y conservar en un nivel aceptable las propiedades del fluido.

Los beneficios de retirar el exceso de recortes del fluido son:

- ✓ Menor costo de tratamiento del fluido
- ✓ Menor torque y arrastre
- ✓ Mayores tasas de penetración
- ✓ Menor pérdida de presión del sistema, lo que genera una menor Densidad Equivalente de circulación (ECD) y menos casos de pérdida de circulación.
- ✓ Se requiere menos agua menores niveles de dilución.
- ✓ Mejores trabajos de cementación.
- ✓ Se evitan casos de atascamiento y pegadura
- ✓ Disminución de desechos, lo cual implica un menor impacto ambiental y menores costos de eliminación de desechos.
- ✓ Menor daño a la formación

### Efecto de los sólidos perforados sobre las propiedades del fluido

Se notarán cambios en las propiedades del fluido a medida que aumentan los sólidos indeseables en éste. Dependiendo de la naturaleza, tamaño y forma de los sólidos, la pérdida de fluido puede aumentar o disminuir. La calidad del revoque se deteriorará, es decir, se hará más grueso y más suave. Los cambios que se notan con mayor rapidez son los de las propiedades reológicas del fluido.

La viscosidad plástica se debe principalmente a la fricción mecánica entre las partículas sólidas en el fluido de perforación. La viscosidad plástica depende principalmente del tamaño, forma y cantidad de sólidos que se encuentran en el fluido. Los aumentos progresivos en la viscosidad plástica pueden indicar una acumulación de sólidos perforados.

El punto cedente y la resistencia gel indican el grado de fuerza de atracción entre las partículas en el fluido, la cual está relacionada con la distancia entre dichas partículas. Cuando se tienen valores de Punto de Cedencia y de resistencias gel excesivos, generalmente se recomienda un tratamiento con un dispersante o defloculante. A medida que la concentración de sólidos aumenta, estos tratamientos son cada vez menos efectivos. En determinado momento, un sobre tratamiento produce un aumento de las propiedades reológicas generales del fluido.

---

---

La cantidad de sólidos necesarios para alcanzar ese nivel depende del tamaño de los mismos. Pueden tolerarse concentraciones menores de sólidos finos. Ya que, la remoción de partículas finas del fluido produce una mayor reducción de la viscosidad que la producida por la remoción de un volumen equivalente de sólidos gruesos, debido a la diferencia en el área superficial.

Cuando el tratamiento químico para la contaminación de sólidos deja de ser efectivo, los sólidos deben diluirse a un nivel aceptable o removerse por medios mecánicos. La acción más prudente es remover los sólidos antes que surja un problema con el tratamiento. Este es el trabajo del equipo de control de sólidos del taladro.

#### Clasificación de las partículas

Los sólidos en los fluidos de perforación pueden clasificarse en dos categorías basándose en la gravedad específica (o peso específico) y en el tamaño de las partículas

#### Gravedad específica

Los sólidos clasificados por la gravedad específica (S.G.) se dividen en dos grupos:

1. Sólidos de alta densidad, S.G. > 4,2 (materiales densificantes)
2. Sólidos de baja densidad, S. G. de 1,6 a 2,9 (promedio de aproximadamente 2,6). Dichos sólidos incluyen: arena, arcillas, lutitas, dolomita, carbonato de calcio y muchos materiales para el tratamiento de fluidos.

En el fluido que contiene sólidos de un solo grupo, la densidad del fluido es una función de la concentración de sólidos. Los fluidos que contienen ambos tipos de sólidos tendrán un contenido total de sólidos que varía de acuerdo con las concentraciones de alta y baja gravedad específica necesarias para lograr una densidad particular.

En un fluido de perforación los sólidos de baja gravedad específica se utilizan en la mayoría de las preparaciones, aún más estos se siguen incorporando durante la misma perforación, éste será siempre el caso normal.

La densidad de los materiales comunes, presentes en los fluidos de perforación se muestra a continuación:

Material	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]
Hematita	5.0
Barita	4.0 - 4.5
Bentonita	2.3 - 2.7
Caliza	2.7 - 2.9
Arena	2.6 - 2.7

---

---

### Tamaño de las partículas

Los sólidos se clasifican de acuerdo al tamaño y se miden en unidades llamadas micrones ( $\mu$ ). Un micrón es 1 / 25.400 de una pulgada y 1 / 1000 de un [mm]. El tamaño de las partículas es importante en el fluido de perforación por las siguientes razones:

1. Mientras más pequeña sea la partícula, más pronunciado es el efecto en las propiedades del fluido.
2. Mientras más pequeña es la partícula, más difícil es remover o controlar sus efectos en el fluido. Las partículas de tamaño coloidal afectan drásticamente las propiedades del fluido.

Es extremadamente importante remover tantas partículas como sea posible en la primera circulación. Las partículas más grandes se convertirán en partículas más pequeñas a medida que reaccionan con el fluido de perforación y circulan a través del sistema.

Tamaño de partícula [Micrones]	Clasificación de la partícula	Tamaño de malla
Mayor que 2000	Grueso	10
2000 – 250	Intermedio	60
250 – 74	Medio	200
74 – 44	Fino	325
44 – 2	Ultrafino	
2 – 0	Coloidal	

### 2.6. Clasificación de los fluidos de perforación de acuerdo a su composición funciones y propiedades para su aplicación

#### Fluidos base acuosa

##### Lodo bentonítico sin densificar

##### Uso

Perforación inicial del pozo. Al contaminarse con materiales del tipo bentonítico se le define como lodo nativo de alta viscosidad

##### Ventajas

Costo bajo por no contener sólidos densificantes. Alta velocidad de penetración debido a su contenido bajo de sólidos. Disminuye su viscosidad con el esfuerzo de corte. Puede ser convertido a un sistema más complejo.

##### Limitaciones

No apto para perforar formaciones inestables (calizas, areniscas y lutitas). Requiere tratamiento mecánico o químico para eliminar los contaminantes bentoníticos que incrementan

su viscosidad plástica y el punto de cadencia reduciendo el avance de perforación. Inestable en presencia de sales  $\text{Ca}^{++}$  y temperaturas cercanas a los  $100^\circ \text{C}$ . Presenta filtración alta y deficiencia en la capacidad de acarreo y suspensión. No inhibe gases tóxicos divalentes. Inestable en presencia de sales divalentes.

Propiedades	Valores Típicos
Densidad	1.02 $[\text{g}/\text{cm}^3]$
Viscosidad Marsh	36 a 55 [seg]
Viscosidad plástica	5 a 9 [cps]
Punto de cedencia	12 a 25 $[\text{lb}/100 \text{ft}^2]$
Gelatinosidad	5 -10 /10-20 $[\text{lb}/100 \text{ft}^2]$
pH	8.5 a 9
Sólidos	3 a 10 %

Componentes	Funciones
Agua $\text{H}_2\text{O}$	Medio continuo
Bentonita	Acarreo y suspensión de sólidos procedentes de la perforación e inherentes al lodo.
Hidróxido de sodio	Control de pH 9 a 10
Pirofosfato ácido de sodio	Control de la viscosidad a temperaturas menores de $100^\circ \text{C}$ . Acción dispersante.
Compuestos tánicos	Control de la viscosidad a temperaturas menores de $100^\circ \text{C}$ . Acción dispersante.
Carboximetil celulosa sódica CMC	Control de la filtración. Temperaturas menores de $100^\circ \text{C}$

#### Lodo bentonítico densificado

##### Uso

Perforación de intervalos que requieren control de la presión para mantener estable el agujero.

##### Ventajas

Comportamiento reológico tixotrópico estable a  $100^\circ \text{C}$  si se controlan mecánicamente los sólidos indeseables.

No tóxico. Bajo costo.

##### Limitaciones

Capacidad de penetración baja debido al empleo de sólidos densificantes. Inestable a temperaturas mayores de  $100^\circ \text{C}$  y presencia de sales divalentes. Se afecta su capacidad de acarreo y suspensión. Se incrementa la pérdida de agua originando atrapamiento de la sarta de perforación. No inhibe gases tóxicos divalentes. No apto para perforar areniscas, calizas y lutitas problemáticas.

Componentes	Funciones
Agua H <sub>2</sub> O	Medio continuo
Bentonita.	Acarreo y suspensión de sólidos procedentes de la perforación e inherentes al lodo.
Barita	Densificante.
Sosa (NaOH)	mantiene el pH entre 9 y 10
Ligno sulfonato sódico conjuntamente con lignito sulfonado.	Control de propiedades reológicas tixotrópicas. Agentes dispersantes.
Almidón modificado	Evita la filtración del medio acuoso.
Hidroxi etil metil celulosa (HEMC)	Evita la filtración del medio acuoso.

### Fluido acuoso base polimérica

#### Composición

Agua, Bentonita, Polímeros hidratables, dispersantes y sales

#### Uso

Perforación de formaciones que requieren densidades mayores de 1.5 [g/cm<sup>3</sup>] y estabilidad a temperaturas máximas de 100° [C]. Perforación de pozos direccionales que requieren gran capacidad de acarreo y remoción de recortes.

#### Ventajas

Fluidos con propiedades reológicas y tixotrópicas necesarias para el acarreo y remoción de recortes. Control de la filtración. Estabilidad del agujero. Económico. Requiere bajas concentraciones de polímeros debido a que la base del sistema es la bentonita.

#### Desventajas

Presenta inestabilidad reológica tixotrópica e incrementos del volumen de filtrado en presencia de sales divalentes como; calcio y magnesio y a temperaturas mayores de 100° [C]. Requiere de prehidratación de la bentonita y de los polímeros si se prepara con el agua de mar. No inhibe formaciones problemáticas que requieren de alta salinidad. No se pueden emplear hidróxidos alcalinos divalentes para el control de gases divalentes, se altera su capacidad de acarreo, suspensión y se incrementa la filtración propiciándose el atrapamiento de la sarta de perforación.

Componentes	Funciones
Agua H <sub>2</sub> O	Medio continuo
Bentonita	Acarreo y suspensión
Acrilato de sodio	Mejora la capacidad de acarreo y controla la filtración
Carboximetilcelulosa modificada	Evita la filtración
Lignosulfonato sódico con lignito sódico	Evita el incremento de la viscosidad
Sosa (NaOH)	Mantiene la alcalinidad entre 9 y 10
Barita	Controla la presión de las formaciones, mantiene estable el agujero.

---

---

### Fluido base agua inhibidor de lutitas

Las lutitas son sensibles a la hidratación lo que ocasiona hinchamientos, derrumbes y /o fracturamientos de este tipo de formaciones, por lo que es necesario que el fluido empleado para su perforación tenga la capacidad de evitar la hidratación. Esto ha sido posible aplicando el principio de presión osmótica, mediante la disolución de sales monovalentes o divalentes en el medio acuoso, de acuerdo con la salinidad de las lutitas, la cual es evaluada previamente, de muestras de núcleos o de canal procedente de pozos de referencia del área a intervenir para determinar la salinidad que es necesario emplear.

El fluido a base de sales de potasio se ha empleado por su gran capacidad para evitar la hidratación de lutitas dado su volumen atómico que bloquea la migración del agua hacia las formaciones.

Uso

Evita la hidratación de las lutitas

Ventajas

Empleo de un menor contenido de material sólido densificante.  
Baja viscosidad lo que permite un mejor avance en la perforación.  
Evita el embolamiento y atrapamiento del equipo de perforación.  
Seguridad en su manejo por el alto punto de ignición.

Desventajas

Inestable a temperaturas mayores de 100° [C].  
Requiere del acarreo de la salmuera de cloruro de potasio a las plataformas.  
Presenta inestabilidad en presencia de hidróxido de calcio.  
Inhibe ligeramente la presencia de H<sub>2</sub>S y el CO<sub>2</sub>.  
Requiere del empleo de agentes secuestrantes de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S.

Componentes	Funciones
Agua H <sub>2</sub> O	Medio continuo
Bentonita prehidratada	Suspensión y acarreo
Potasa KOH	Imparte pH entre 9 -10
Asfaltos sulfonados de carácter aniónico polivalente	Controla la filtración y la dispersión
Cloruro de Potasio KCl	Bloquea la capacidad de hidratación de lutitas
Hidroxi etil celulosa modificada	Inhibe la filtración, ayuda al acarreo de recortes.
Goma Xantana	Ayuda al acarreo y al control de la filtración
Ferrolignosulfonato	Controla la filtración y dispersión
Barita	Controla la presión de las formaciones.

### Fluido base agua para alta temperatura

Estos sistemas presentan estabilidad a temperaturas mínimas de 260° [C], a la acción de agentes contaminantes severos, gases ácidos, iones calcio y sales. Esto ha sido posible por el

---

---

---

empleo de productos químicos naturales y sintéticos que se han modificado en su estructura para este fin, además de que reducen el contenido de bentonita ya que pueden desarrollar en un medio acuoso, viscosidad y gelatinosidad necesarias para acarrear o suspender partículas sólidas.

#### Uso

Perforación de intervalos que presentan temperaturas de hasta 260° [C].

#### Ventajas

Estable a temperaturas hasta 260° [C]

Capacidad de inhibir gases ácidos

Estable a la acción de sales y calcio

Emplea menor cantidad de sólidos

Se le pueden adicionar polímeros que encapsulen los sólidos finos evitando se incremente la viscosidad.

#### Desventajas

Inestable en presencia de alto contenido de sólidos lo que los hace depender de la eficacia del equipo eliminador de sólidos (Temblorinas, desarcilladores y desarenadores), los cuales llegan a ser deficientes debido a que los polímeros forman películas en las cribas que impiden la separación de sólidos.

Emplea muchos aditivos lo que dificulta su manejo en campo.

Propiedades tixotrópicas bajas.

Componentes	Funciones
Agua H <sub>2</sub> O	Medio continuo
Barita	Aumenta la densidad
Bentonita prehidratada tratada	Suspensión y acarreo
Sosa caustica (NaOH)	Imparte pH entre 9 -10
Cal (Ca(OH) <sub>2</sub> )	Control de CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S
Lignosulfonato y lignito Calcico	Dispersante
Carboximetilcelulosa tratada	Controla la filtración a temperaturas altas

Propiedades	Valores típicos
Densidad	Intervalo a perforar
Viscosidad Marsh	25 a 30 segundos
Viscosidad plástica	Baja
Punto de cedencia	Bajo
Calcio	0-200 mg/l
pH	10.5 a 11.5
Cloruros Cl <sup>-</sup>	0-10000 mg/l

Se puede adicionar aditivos encapsuladores, Polyplus. Sales de potasio para inhibir luitas

---

---

### Fluido base agua de mar inhibidor de lutitas

El empleo de agua de mar se lleva a cabo con bentonita previamente hidratada con agua dulce para minimizar el efecto de los iones  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  pero debido al área restringida de que se dispone en una plataforma y al abastecimiento de agua dulce requerido se complica esta operación. Para resolver este problema se emplea la goma xantana con la que se puede utilizar con el agua de mar y sales de cloruro de potasio para impedir la hidratación de lutitas problemáticas.

#### Uso

Perforación de lutitas hidratables

#### Ventajas

Empleo de agua de mar, reduce el abastecimiento de agua dulce para elaborar fluido de perforación.

Substancias de fácil manejo.

Bajo contenido de sólidos, lo que permite el avance de perforación.

Evita el embolamiento y atrapamiento de la sarta de perforación.

#### Desventajas

El ion calcio afecta su estabilidad reduciendo su viscosidad y gelatinosidad

Inhibe ligeramente la presencia de gases ácidos.

Requiere del uso de biocida e inhibidores de corrosión.

Componentes	Funciones
Agua $\text{H}_2\text{O}$	Medio continuo
Barita	Aumenta la densidad
Bentonita prehidratada	Suspensión y acarreo
Acetato de K	Regulador de pH
Polyacrilamida	Encapsula inhibiendo la hidratación de la lutita
Lignosulfonato de potasio	Acción dispersante y control de filtración ATP
Lignino amidato	Acción dispersante y control de filtración ATP
Alcoholato cálcico	Antiespumante

### Sistemas de fluido base agua de mar con aditivos líquidos para inhibir lutitas.

El empleo de sales para el control de la presión osmótica para inhibir lutitas hidratables requiere ciertos cuidados cuando se le adicionan tanto al agua de mar como al agua dulce sobre todo las salmueras a base de cloruro de calcio las cuales generan pH ácidos además una vez que se integran los sistemas al agregar los materiales sólidos no se incorporan rápidamente y por lo tanto las formaciones de lutitas hidratables empiezan a presentar problemas de hinchamiento por tal motivo se ha visto la posibilidad de tener medios líquidos que rápidamente se incorporen e inhiban las formaciones problemáticas.

---

---

Entre los materiales líquidos se han seleccionado a los glicoles, trietanol amina, dietanol amina y silicatos de sodio para inhibirlas.

Es importante que el sistema base agua de mar y polímeros sean compatibles con los materiales.

#### Uso

Inhibidor de hidratación de lutitas hidratables

#### Ventajas

Se incorpora rápidamente para el control de lutitas durante las operaciones de perforación.

Es resistente a altas temperatura.

No requiere aditivos alcalinizantes en el caso de usar aminas y silicatos.

Se inhiben gases ácidos si se emplean trietanol, mono o dietanol aminas.

El uso del agua de mar elimina tiempos de espera para surtir fluidos o agua dulce lo que reduce costos operacionales.

No se emplea aceite diesel ni aceites minerales.

Tiene un alto punto de ignición.

Se pueden emplear en mezclas de agua de mar y sales, para bajar la concentración de los inhibidores líquidos.

#### Desventajas

Requiere de un control eficiente de eliminación de sólidos los cuales incrementan la viscosidad.

El uso de silicatos no es recomendable por ser muy alcalino y cristaliza a bajas temperaturas.

El cemento es perjudicial para estos sistemas es necesario el empleo de tratamientos para reducir el efecto nocivo del calcio.

Se requiere de una supervisión constante para mantener las concentraciones de polímeros.

Componentes	Funciones
Agua H <sub>2</sub> O	Medio continuo
Goma Xantana	Viscosidad y suspensión
CMC modificada	Control de Perdida de filtrado
Lignosulfonato y asfalto sulfonado	Control de Perdida de filtrado y control de propiedades reológicas
Salmuera de cloruro de sodio y/o potasio	Inhibición de lutitas
Barita	Densificante
Lignosulfonato Calcio	Control de propiedades reológicas
Carboximetilcelulosa modificada	Viscosificante, gelante Controla la filtración a temperaturas altas

---

# **Capitulo 3**

## **CÁLCULOS DE INGENIERÍA PARA LA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN.**

### 3. CÁLCULOS DE INGENIERÍA PARA LA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN.

En la perforación de pozos se realizan varios cálculos de ingeniería como: capacidades y volúmenes de los tanques, tuberías y pozos. Tiempos de circulación, velocidades del fluido en el espacio anular, en la tubería y varios cálculos importantes como el entendimiento y el uso del concepto de balance de materia así como la optimización de la hidráulica, que están relacionados directamente con el sistema de circulación, dicha optimización proporcionan una eficiente limpieza en el fondo del agujero, logrando con eso un mejor avance de perforación. Lo básico en estos cálculos son las caídas de presión por fricción en: el equipo superficial, interior de las tuberías y espacio anular. Para lograr una mayor comprensión en los modelos matemáticos que se utilizan para las caídas de presión, es necesario tener los conocimientos básicos de conceptos de reología, tixotropía, clasificación de los fluidos, patrones de flujo y fricción en las tuberías.

Para considerar los volúmenes o capacidades se relaciona con una interpretación grafica llamada **estado mecánico del pozo** el cual nos sirve de gran ayuda para calcularlos.

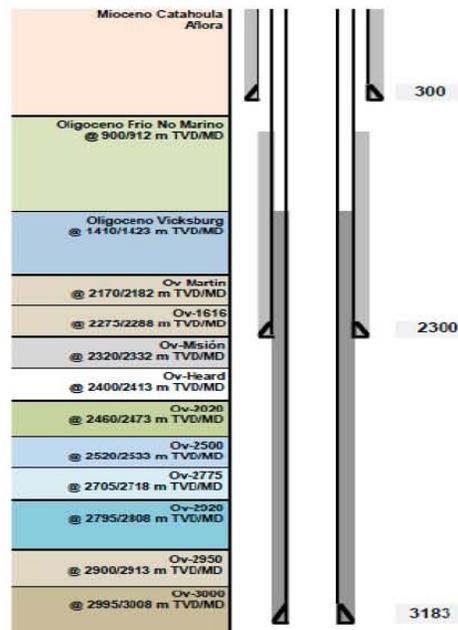


Figura 4.1 Estado mecánico de pozo

---

---

### 3.1 Volumen del pozo.

Aunque los volúmenes del pozo sean generalmente calculados con la tubería dentro del pozo, ocasionalmente necesitamos conocer la capacidad del pozo sin la tubería. La capacidad vertical de un intervalo de pozo puede ser calculada usando la ecuación para un recipiente cilíndrico vertical. Un pozo se compone generalmente de varios intervalos, con los diámetros más grandes cerca de la superficie, pasando progresivamente a secciones más pequeñas a medida que la profundidad aumenta. Para obtener la capacidad de todo el pozo, cada intervalo debe ser calculado individualmente, luego se suman todos los intervalos.

Para los intervalos de "pozo abierto", el tamaño real del pozo puede ser considerablemente más grande que el tamaño de la barrena, debido al ensanchamiento del Pozo.

El volumen de cada sección puede ser calculado a partir de la ecuación usada para un cilindro:

$$V_{\text{sección}} = \frac{\pi D^2 L}{4} = \frac{3.1416 \times D_{\text{pozo}}^2 \times L}{4} = \frac{D_{\text{pozo}}^2 \times L}{1.273}$$

Donde:

$D_{\text{pozo}}$  = Diámetro Interior (DI) de la tubería de revestimiento, tubería de revestimiento corta o pozo abierto

L = Longitud del intervalo

Cuando el tamaño o diámetro del pozo ( $D_{\text{pozo}}$ ) está expresado en pulgadas:

$$V_{\text{Sección}} \left( \frac{\text{bbl}}{\text{ft}} \right) = \frac{D_{\text{pozo}}^2 (\text{in})}{1029}$$

Muchas regiones usan pulgadas para indicar el diámetro del pozo y de la barrena, y el sistema métrico para indicar otros valores. En este caso, el volumen puede ser calculado en diferentes formas.

### 3.2 Capacidad de la tubería de perforación.

El volumen del pozo con la columna de perforación dentro del pozo es la suma del volumen dentro de la columna de perforación (capacidad) más el volumen anular entre la columna de perforación y la tubería de revestimiento o el pozo abierto.

La capacidad o el volumen dentro de una columna de perforación, expresado en bbl/ft, puede ser determinado a partir del diámetro interior de la tubería en pulgadas.

$$V_{\text{Tubería}} \left( \frac{\text{bbl}}{\text{ft}} \right) = \frac{D_{\text{Tubería}}^2 (\text{in})}{1029}$$

### 3.3 Volumen anular

---

---

El volumen o la capacidad anular se calculan restando las áreas de los dos círculos que define el espacio anular. El volumen anular en bbl/ft puede ser determinado a partir del DE de la tubería y del DI de la tubería de revestimiento o del pozo abierto en pulgadas.

$$V_{\text{Espacio Anular}} \left[ \frac{\text{bbl}}{\text{ft}} \right] = \frac{DI_{\text{Pozo}}^2 [\text{in}] - DE_{\text{Tubería}}^2 [\text{in}]}{1029}$$

Donde:

DI<sub>Pozo</sub> = Diámetro interior del pozo abierto o la tubería de revestimiento

DE<sub>Tubería</sub> = Diámetro exterior de la tubería de perforación

El volumen anular también puede ser determinado restando el desplazamiento y la capacidad de una tubería de la capacidad de un pozo o una tubería de revestimiento.

$$V_{\text{Espacio Anular}} = \text{Capacidad}_{\text{Pozo}} - \text{Desplazamiento}_{\text{Columna de Perforación}} - \text{Capacidad}_{\text{Columna de Perforación}}$$

### 3.4 Desplazamiento

Se puede estimar el desplazamiento de la columna de perforación ( $V_{\text{Despl. Tubería}}$ ) usando el DE y el DI de la tubería de perforación.

$$V_{\text{Despl. Tubería}} \left[ \frac{\text{bbl}}{\text{ft}} \right] = \frac{DE_{\text{Tubería}}^2 [\text{in}] - DI_{\text{Tubería}}^2 [\text{in}]}{1029}$$

Donde:

DE<sub>Tubería</sub> = Diámetro exterior de la tubería de perforación

DI<sub>Tubería</sub> = Diámetro interior de la tubería de perforación

### 3.5 Velocidad Anular

La Velocidad Anular (comúnmente referida como VA) es la velocidad media a la cual un fluido está fluyendo dentro de un espacio anular. Se requiere una velocidad anular mínima del lodo para lograr la limpieza apropiada del pozo. Esta velocidad anular mínima depende de varios factores, incluyendo la velocidad de penetración, el tamaño de los recortes, el ángulo del pozo, la densidad del lodo y la reología. Estos aspectos están descritos en el capítulo sobre la limpieza del pozo.

La siguiente ecuación calcula la velocidad anular basándose en el caudal de la bomba y el volumen anular del pozo:

$$VA \left[ \frac{\text{m}}{\text{min}} \right] = \frac{\text{Caudal de la bomba}}{\text{Volumen anular}} = \frac{V_{\text{Caudal de la bomba}}}{V_{\text{An}}} = \frac{V_{\text{Caudal de la bomba}} \left[ \frac{\text{lt}}{\text{min}} \right]}{V_{\text{An}} \left[ \frac{\text{lt}}{\text{m}} \right]}$$

Donde:

VA = Velocidad Anular

---

---

$V_{\text{Caudal de la Bomba}} = \text{Caudal de la bomba}$

$V_{\text{An}} = \text{Volumen anular}$

Cuando el caudal de la bomba de lodo está indicado en [bbl/min] y el DI del pozo y el DE de la tubería están indicados en pulgadas, la velocidad anular en [ft/min] es:

$$VA \left[ \frac{\text{ft}}{\text{min}} \right] = \frac{V_{\text{Caudal de la bomba}} \left[ \frac{\text{bbl}}{\text{min}} \right] \times 1029}{DI_{\text{Pozo}}^2 [\text{in}] - DI_{\text{Tubería}}^2 [\text{in}]}$$

Donde:

$DI_{\text{Pozo}} = \text{DI del pozo abierto o la tubería de revestimiento [in]}$

$DE_{\text{Tubería}} = \text{DE de la tubería de perforación o la herramienta [in]}$

### 3.6 Tiempos de Circulación

El tiempo de circulación total es el tiempo o número de carreras requerido para que el lodo circule a partir de la succión de la bomba, bajando por la columna de perforación, saliendo por la barrena, subiendo de nuevo por el espacio anular hasta la superficie, pasando a través de los tanques, y finalmente, regresando de nuevo a la succión de la bomba.

Este tiempo también se llama "tiempo de ciclo del lodo" y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Tiempo de circulación total [min]} = \frac{V_{\text{Sistema}}}{V_{\text{Caudal de la Bomba}}}$$

Donde:

$V_{\text{Sistema}} = \text{Volumen total del sistema activo [bbl] o [m}^3\text{]}$

$V_{\text{Caudal de la Bomba}} = \text{Caudal de la bomba [bbl/min] o [m}^3\text{/min]}$

$\text{Circulación total (carreras)} = \text{Tiempo de circulación total [min]} \times \text{velocidad de la bomba [stk/min]}$

El tiempo del fondo a superficie es el tiempo (o número de carreras) requerido para que el lodo circule desde la barrena ubicada al fondo del pozo hasta la superficie, subiendo por el espacio anular. El tiempo del fondo a superficie se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Tiempo del fondo a superficie [min]} = \frac{V_{\text{Espacio Anular}}}{V_{\text{(Caudal de la Bomba)}}}$$

Donde:

$V_{\text{Espacio Anular}} = \text{Volumen anular [bbl] o [m}^3\text{]}$

$V_{\text{Caudal de la Bomba}} = \text{Caudal de la bomba [bbl/min] o [m}^3\text{/min]}$

$\text{Retorno (carreras)} = \text{tiempo del fondo a superficie [min]} \times \text{velocidad de la bomba [stk/min]}$

El tiempo de ciclo en el pozo es el tiempo o número de carreras requerido para que el lodo circule a partir de la succión de la bomba, bajando por la columna de perforación, saliendo por

---

---

la barrena, subiendo de nuevo por el espacio anular hasta la superficie, calculado de la siguiente manera:

$$\text{Tiempo de ciclo en el pozo [min]} = \frac{V_{\text{Pozo}} - V_{\text{Despl Col Perf}}}{V_{\text{Caudal de la Bomba}}}$$

Donde:

$V_{\text{Pozo}}$  = Volumen total del pozo [bb] o  $[m^3]$

$V_{\text{Despl Col Perf}}$  = Desplazamiento de la columna de perforación [bb] o  $[m^3]$

$V_{\text{Caudal de la Bomba}}$  = Caudal de la bomba [bb/min] o  $[m^3/\text{min}]$

Ciclo en el pozo (carreras) = Tiempo de ciclo en el pozo [min] x velocidad de la bomba [stk/min]

Observación: Los tiempos de carrera también pueden ser calculados dividiendo un volumen determinado por el caudal de la bomba en [bb/stk] o  $[m^3/\text{stk}]$ .

### 3.7 Balance de Materia

La capacidad de realizar un balance de materiales constituye un elemento esencial de la ingeniería de fluidos de perforación. Los análisis de sólidos, las diluciones, y la ecuación de densidad creciente y mezcla están basados en los balances de materiales.

El concepto de balance de materiales está basado en la ley de conservación de la masa, la cual estipula que la masa no puede ser ni creada ni destruida. Simplemente dicho, la suma de los componentes debe ser igual a la suma de los productos. Este concepto es válido para la masa y los átomos, pero no es siempre válido para las soluciones y los compuestos, debido a las solubilidades y las reacciones químicas.

Cálculos para determinar la cantidad de materiales utilizados para fabricar un lodo mediante el uso de la ecuación de balance de materia.

Existen tres ecuaciones fundamentales usadas para el cálculo de la densidad del lodo; las cuales son:

Masa final de la mezcla = Masa del lodo original + Masa del material agregado.

$$M_F = M_{\text{Original}} + M_{\text{Agregado}}$$

Volumen final de la mezcla = volumen de lodo original + volumen del material agregado.

$$V_F = V_{\text{Original}} + V_{\text{Agregado}}$$

Densidad final de la mezcla = peso final de la mezcla entre volumen de la mezcla

---


$$\rho_f = \frac{\text{Masa total de la mezcla}}{\text{Volumen total de la mezcla}} = \frac{M}{V}$$

De la ecuación de balance de masa tenemos:

$$\rho_L = \frac{M_1 + M_2 + \dots + M_n}{V_1 + V_2 + \dots + V_n} = \frac{M_{\text{agua}} + M_{\text{bent}} + \dots + M_{\text{bar}}}{V_{\text{agua}} + V_{\text{bent}} + \dots + M_{\text{bar}}}$$

Pero  $V_i = m_i / \rho_i$ , de lo cual:

$$\rho_L = \frac{\rho_{\text{agua}} V_{\text{agua}} + M_{\text{bent}} + M_{\text{bar}}}{V_{\text{agua}} + \frac{M_{\text{bent}}}{\rho_{\text{bent}}} + \frac{M_{\text{bar}}}{\rho_{\text{bar}}}}$$

En la ecuación (2) la incógnita es la masa de la barita ( $m_{\text{bar}}$ ) necesaria para proporcionar la densidad del lodo requerido ( $\rho_L$ ), despejando  $m_{\text{bar}}$  tenemos:

$$M_{\text{bar}} = \frac{\rho_L \left( V_{\text{agua}} + \frac{M_{\text{bent}}}{\rho_{\text{bent}}} \right) - \rho_{\text{agua}} V_{\text{agua}} - M_{\text{bent}}}{1 - \frac{\rho_L}{\rho_{\text{bar}}}}$$

Observación: El balance de materiales es válido tanto para las unidades norteamericanas como para las unidades métricas, siempre que se use la misma unidad para todos los cálculos.

### 3.8 Hidráulica de la Perforación

La planificación de la hidráulica es parte del proceso general de optimización de la perforación. Esto incluye un balance calculado de los distintos componentes de sistema de circulación para hacer máxima la ROP y mantener limpios la barrena y el agujero mientras se está dentro de las fuerzas del pozo, la superficie y el equipo de fondo.

#### Consideraciones para la planificación hidráulica

##### Optimización de la Velocidad de Perforación (ROP)

La remoción de los recortes del fondo del agujero está relacionada con la energía del fluido disipada en la barrena o potencia hidráulica consumida en la barrena. Se ha demostrado que la potencia hidráulica en la barrena está optimizada cuando la presión diferencial, caída de presión a través de la barrena, es igual a dos tercios de la presión total en el sistema presión de

---

---

bombeo. El proceso de hacer máximo el sistema de potencia hidráulica, puede ser utilizado para incrementar la velocidad de perforación en formaciones medias y duras.

#### Limpieza del Pozo

En formaciones blandas o en pozos desviados, la limpieza del fondo del pozo es muchas veces el factor predominante. Hay poco sentido en la maximización del ROP por medio de la selección de toberas que optimicen la potencia hidráulica o la fuerza de impacto, si la tasa de flujo o gasto resultante es insuficiente para levantar los recortes fuera del agujero. En estas circunstancias es preferible determinar primero una tasa de flujo adecuada y después optimizar la hidráulica.

#### Pérdidas de Presión por Fricción en el Espacio Anular

Dentro de un agujero estrecho o pozos profundos la caída de presión por fricción en el espacio anular, necesita ser considerada. Si es demasiado alta, la caída de presión por fricción en el espacio anular incrementará la Densidad Equivalente de Circulación (ECD) y puede llevar a pérdida de circulación, atrapamiento diferencial o inestabilidad del agujero.

#### Erosión

Las formaciones blandas y no-consolidadas son propensas a la erosión, si la velocidad en el espacio anular y por lo tanto la tasa de flujo o el gasto son demasiado altas o si el espacio anular es demasiado pequeño se tiene la posibilidad de flujo turbulento. En estas instancias, se requerirá una reducción en el gasto de flujo para minimizar la erosión.

#### Pérdida de Circulación

Para el caso de que se anticipe una gran pérdida de circulación, los obturantes podrían ser bombeados y tal vez sea necesario instalar toberas más grandes en la barrena para así minimizar el riesgo de taponar la barrena.

#### Factores que afectan la hidráulica

Los equipos instalados en la unidad de perforación, la sarta de perforación, y las herramientas de fondo, la geometría del pozo, el tipo de lodo y sus propiedades, son todos factores que pueden afectar la hidráulica.

#### Equipos Instalados

El mayor factor del equipo instalado es la limitación de la presión de bombeo y el rendimiento en volumen de las bombas de lodo en uso. Incrementando el tamaño de las camisas en la bomba, se incrementará el rendimiento en volumen, pero se disminuirá la máxima presión de bombeo permitida. La mayoría de las líneas de alta presión que van desde las bombas de lodo

---

---

hasta el "Kelly" o "Top Drive" son diseñadas para presiones de trabajo más altas que las de la bomba.

#### Sarta de Perforación y Herramientas de Fondo

El efecto principal de la sarta de perforación es la caída de presión por fricción o pérdidas de presión parásita, que ocurre dentro de la tubería de perforación y los lastra barrena.

Para una tasa de flujo y una profundidad dadas, una sarta de perforación, con un diámetro interior más pequeño, tendrá pérdidas de presión parásitas, más altas. Por lo tanto, uno de los beneficios de utilizar tubería de 5 1/2" OD en vez de una de 5" OD, es que para el mismo gasto de flujo existe más presión disponible en la barrena para optimizar el tamaño de las toberas o que para la misma pérdida de presión parásita en la sarta de perforación, habrá más gasto de flujo disponible. La adición de herramientas de fondo puede tener un efecto en la caída de presión disponible o permisible a través de la barrena. Las herramientas MWD de pulso negativo, requieren un aproximado de caída de presión de 800 psi por debajo de ellas para la transmisión adecuada de datos en tiempo real. La mayoría de los estabilizadores ajustables requieren de 450 a 800 psi de caída de presión por debajo de la herramienta, estando la barrena arriba del fondo, para su operación o activación. Los motores navegables con barrenas PDC tienen una caída total de presión de 1,200 a 1,500 [psi].

Esta caída de presión está compuesta por:

- ✓ Presión diferencial de 200 [psi] con la barrena sin tocar el fondo
- ✓ Caída de presión de perforación de 600 a 800 [psi] para motores de alta torsión y baja velocidad.
- ✓ Caída de presión de perforación de 1,000 a 2,000 [psi], para motores de alta velocidad.
- ✓ Caída de presión para evitar parada del motor, 400-500[psi].

Los motores navegables con barrenas de tres conos, tienen una caída total de presión de 400 a 600 [psi], debido a la torsión reactiva más baja de las barrenas tricónicas, comparadas con las PDC.

Esta caída de presión está compuesta por:

- ✓ Presión diferencial de 200 [psi] con la barrena sin tocar el fondo
- ✓ Caída de presión de perforación de 200 a 400 [psi] para motores de alta torsión y baja velocidad.
- ✓ No caída de presión por parada debido a la torsión reactiva más baja.

#### Geometría del Pozo

Mientras más profundo sea el agujero, más alta será la pérdida de presión parásita dentro de la sarta de perforación y menor será la presión disponible para ser consumida en la barrena y optimizar el tamaño de las toberas.

---

---

Mientras más grande sea el diámetro del agujero, más baja será la velocidad en el espacio anular para un gasto o tasa de flujo dado y más difícil será la remoción efectiva de recortes del agujero.

Al contrario, y mientras más pequeño sea el diámetro del agujero, más alta será la presión por fricción dentro del espacio anular y más grande será el efecto sobre la ECD.

#### Tipo de Lodo y sus Propiedades

La densidad y reología del lodo afectan directamente las pérdidas de presión junto con el sistema de circulación. La reología del lodo y los diferentes modelos disponibles, serán vistos más adelante:

#### Gasto de Flujo o Gasto Caudal

- ✓ El gasto o tasa de flujo deberá ser mantenido a 30-60 [gpm] por pulgada de diámetro de barrena.
- ✓ No se debe reducir el gasto de flujo (caudal) para lograr mayor potencia.
- ✓ Una tasa de flujo demasiado baja causará el embotamiento de la barrena y reducirá la limpieza efectiva de pozo.

#### Potencia Hidráulica

Mantenga un consumo de potencia hidráulica de 2.5 a 5.0 [HHP] por pulgada cuadrada de diámetro de barrena. Se deberá considerar el uso de potencia hidráulica máxima, cuando se tiene suficiente potencia de bombeo disponible.

#### Caída de Presión a través de la Barrena

Diseñe la hidráulica para tener una caída de presión a través de la barrena entre el 50% y el 65% de la presión total de circulación disponible en superficie. Si las pérdidas de presión parásita son mayores al 50% de la presión de bombeo disponible, entonces optimice la velocidad del chorro de lodo en las toberas de la barrena.

#### Velocidad del Chorro

La velocidad del chorro afecta la permanencia de las astillas en el fondo así como la velocidad de perforación. Se debe mantener la velocidad del chorro por encima de 250 [ft/seg].

#### Cálculos hidráulicos.

Para optimizar la hidráulica en la barrena y por lo tanto el desempeño la misma, se debe considerar la totalidad del sistema hidráulico.

---

---

Los siguientes factores serán discutidos:

- ✓ Presión circulante
- ✓ Gastos o caudales de flujo
- ✓ Velocidad óptima del fluido en el espacio anular
- ✓ Pérdidas de presión en el sistema
- ✓ Caída de presión a través de la barrena
- ✓ Potencia hidráulica consumida en la barrena
- ✓ Velocidad del chorro y fuerza de impacto del chorro

#### Selección de la Presión de Bombeo y Tasa de Flujo

Se deben seleccionar una tasa de flujo y una presión de circulación resultante suficiente para permitir una buena limpieza de pozo y la potencia adecuada en la barrena, pero que no exceda la presión de superficie máxima permitida. El gasto de flujo óptimo, dependerá de todas las pérdidas de presión del sistema y de si la hidráulica de la barrena será optimizada con base en la potencia hidráulica o en el modelo de fuerza de impacto del chorro. Una vez que se haya seleccionado el gasto de flujo óptimo, se deben considerar los siguientes factores:

- ¿Serán las bombas capaces de bombear a la velocidad de flujo deseado?
- ¿Se encuentra el gasto de flujo deseado dentro del rango operativo de cualquier herramienta de fondo en la sarta?
- ¿Excederá el óptimo gasto de flujo deseado la velocidad anular mínima?
- ¿Excederá el óptimo gasto de flujo deseado la velocidad anular máxima?

#### Velocidad Anular

Cuando se diseña el programa hidráulico, la velocidad anular, debe ser considerada. Es importante evitar la retención de sólidos en el espacio anular, debido a que el incremento subsiguiente en la densidad del lodo y el calor hidrostático, podría causar pérdidas de fluido hacia las formaciones.

Un valor óptimo para la velocidad anular es seleccionado entre el límite alto y bajo permisible. La velocidad del fluido en el espacio anular está en su punto más bajo en sitios en donde el área seccional anular sea mayor. Debido a que el espacio anular alrededor de la tubería de perforación tiene la mayor área seccional dentro del agujero, la velocidad anular llega a su punto más bajo en dicho espacio. Al contrario, la velocidad del espacio anular estará en su punto más alto alrededor de la lastra barrena. La velocidad anular alrededor de la tubería de perforación, deberá ser calculada para determinar si es lo suficientemente alta para limpiar el agujero de forma efectiva. Sin embargo, en ciertas formaciones blandas propensas a erosión, la velocidad anular alrededor de los lastra barrena, también deberá ser calculada. Si ésta última es demasiado alta, la velocidad de circulación deberá ser reducida o se deberán utilizar lastra barrena más pequeños. Para un tamaño dado de tubería de perforación y agujero, la velocidad anular sólo podrá ser cambiada, variando la tasa de flujo o caudal entregado por la bomba.

---

---

La velocidad del fluido en el espacio anular alrededor de la sarta de perforación, está usualmente dada por la expresión:

$$V_a = \frac{24.51 \times Q}{ID^2 - OD^2}$$

Donde:

V<sub>a</sub> = velocidad anular, [ft/min].

Q = gasto de flujo, [gpm]

ID = diámetro del agujero o ID de la TR, pulgadas

OD = diámetro exterior ya sea de la tubería o de los acoples, pulgadas

#### Velocidad Anular Mínima

La velocidad anular mínima es determinada por medio de la capacidad de transporte de los recortes del fluido de perforación. Si el pozo no se limpia de manera eficiente, habrá una acumulación de recortes en el espacio anular, que resultará en un incremento de densidad del lodo. El consecuente incremento en la presión hidrostática podría causar pérdidas de fluido a la formación. En los pozos desviados, se podrían desarrollar camas de recortes lo que conlleva a su vez al riesgo incrementado de atrapamiento de la tubería por empacado de recortes. Debido a esto la velocidad anular deberá, con relación a la generación de recortes, ser suficiente para removerlos en la medida que se producen y así mantener la densidad del fluido por debajo de la presión de fractura de la formación. Otro factor que gobierna el límite inferior de la velocidad anular, es la velocidad de asentamiento, en el espacio anular, de los recortes perforados. Si la velocidad de asentamiento excede la velocidad anular, entonces se desarrollarán camas de recortes y se incrementará la densidad del fluido de perforación. La capacidad de transporte de los recortes de un sistema de lodos, está altamente influenciado por su viscosidad y fuerza del gel.

#### Velocidad Anular Máxima

También es importante evitar erosionar formaciones sueltas y lutitas blandas, que podrían resultar en grandes ensanchamientos, problemas de agujero, atrapamientos de tubería y trabajos deficientes de cementación. Debido a esto la velocidad anular máxima se encuentra limitada por las fuerzas dentro del agujero y en particular en las formaciones sensitivas, en donde a menudo está limitada a 100 [ft/min]. Sin embargo, la velocidad de erosión de las formaciones blandas está más influenciada por el régimen del flujo en el espacio anular, que por la velocidad como tal. El flujo turbulento es mucho más erosivo que el flujo laminar y desestabilizará fácilmente las formaciones sensitivas. Por ello es usualmente deseable tener flujo laminar alrededor de la tubería.

Una vez que los límites operativos para la velocidad anular han sido determinados, es posible seleccionar la presión de bombeo y el gasto o caudal de flujo, basados en las limitaciones del

---

---

equipo en superficie y en el deseo de mantener el flujo laminar en el espacio anular o limitar el ECD (Densidad Equivalente de Circulación).

Estimación del Número de Reynolds y del Régimen de Flujo

El tipo de comportamiento de flujo del fluido en el espacio anular, es descrito calculando su número de Reynolds (Re). Existen varios métodos para calcular el número de Reynolds, dependiendo del modelo reológico utilizado para describir el comportamiento del fluido. Mayor información sobre los modelos reológicos y el número de Reynolds es mostrado más adelante. Todas las ecuaciones en esta sección suponen que el flujo de los fluidos se rige por el modelo de la llamada "Ley de Potencia" ("Power Law").

Antes de calcular el número de Reynolds para una sección dada, se deben calcular las constantes n y K de la ecuación del modelo de flujo de la Ley de Potencia así como la viscosidad efectiva o aparente ( $\eta_e$ ) del fluido. Estas serán calculadas por separado para el flujo en la tubería y en el espacio anular.

#### Definiciones

Factor de Consistencia (K, en centipoises, [cp])

Describe la viscosidad del fluido y es idéntico en concepto a la Viscosidad Plástica,  $V_p$ , donde el flujo es dinámico solamente.

Índice de Flujo (n, sin dimensiones)

Describe la relación numérica entre el esfuerzo cortante aplicado al fluido y la velocidad de cambio de dicho esfuerzo cortante graficados en un papel doblemente logarítmico. Indica el grado de cizallamiento o fluidez; la capacidad de flujo o la resistencia al mismo cuando se aplica una fuerza cizallante o de corte sobre el conducto.

Viscosidad Efectiva ( $\mu_e$ , [cp])

Describe la resistencia del fluido a fluir a través de una geometría particular. El fluido fluyendo a través del espacio anular tendrá una viscosidad efectiva diferente a la que tiene cuando fluye dentro de la tubería de perforación, y por lo tanto tendrá diferentes valores para n y K.

Nota: Existen diferentes juegos de ecuaciones utilizadas para definir los parámetros hidráulicos, dependiendo del modelo reológicos seleccionado. Los diferentes juegos de ecuaciones son validos para el comportamiento del fluido en flujos laminares y turbulentos y solamente difieren en su enfoque. Nótese que los ejemplos que siguen usan el método de API para de cálculo para fluidos que siguen la Ley de Potencia en su comportamiento de flujo. Las ecuaciones utilizan las lecturas obtenidas en el viscosímetro Fann a 600 y 300 RPM, que pueden entonces ser re-calculadas a partir de la viscosidad plástica y de los valores del punto de cedencia, como sigue:

$\theta_{300}$  = Viscosidad plástica + Punto de cedencia

$\theta_{600}$  = Punto de cedencia +  $\theta_{300}$

$\theta_3$  = Gel de 10 segundos (obtenida en un viscosímetro con rotador de palanca manual).

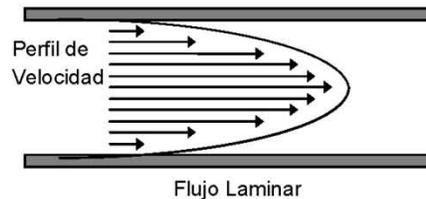
---

---

$\theta_3 = \theta_3$  (utilizando un viscosímetro FANN de 6 velocidades).

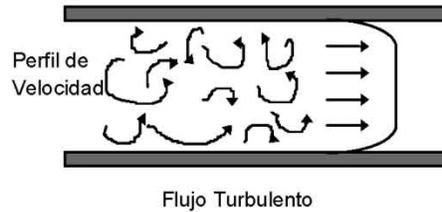
#### Flujo Laminar

Las partículas de lodo se mueven en líneas derechas paralelas a la tubería o las paredes del agujero descubierto. Las capas adyacentes de lodo tienen distintos planos de esfuerzo cortante entre ellas y se mueven una después de la otra sin mezclarse. Las partículas más cercanas a la pared son efectivamente estacionarias pero alrededor del centro se mueven progresivamente más rápido, a medida que los efectos de la fricción son reducidos. Por lo tanto, el fluido que se mueve bajo condiciones de flujo laminar tiene un perfil de velocidad cónico o parabólico.



#### Flujo Turbulento

En contraste a las condiciones de flujo laminar, el perfil de velocidad del flujo turbulento es casi plano. El flujo turbulento ocurre a tasas de flujo más altas cuando los planos entre las capas de lodo dejan de ser discretas y el lodo fluye en forma caótica.



#### Cálculos del Flujo dentro de la Tubería

##### Parámetros "K" y "n"

Los valores de n y K para altos esfuerzos se pueden re-calcular a partir de las lecturas del viscosímetro a 600 y a 300 [rpm] y son usados para cálculos dentro de la tubería de perforación.

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

$$k_p = \frac{511 \times \theta_{300}}{511^{n_p}}$$

---

---

Donde:

$n_p$  = índice de flujo dentro de la tubería de perforación

$K_p$  = factor de consistencia en la tubería de perforación, en [cp]

Velocidad de Flujo en la Tubería

$$V_p = \frac{0.408 \times Q}{ID_{DP}^2}$$

Donde:

$V_p$  = velocidad del fluido dentro de la tubería de perforación [ft/seg].

$Q$  = tasa de flujo en [gpm]

$ID_{DP}$  = diámetro interno de la tubería de perforación o los lastra barrena, pulgadas

Cálculos de flujo en el espacio anular

K y n

Los valores n y K para bajo esfuerzo cortante se pueden re-calcular a partir de las lecturas en el viscosímetro a 100 y a 3 [rpm] y son utilizados para cálculos de flujo en el espacio anular.

$$n_a = 0.657 \times \left( \frac{\log \left( \frac{\theta_{100}}{\theta_3} \right)}{\log \left( \frac{100}{3} \right)} \right)^{300}$$

$$k_a = \frac{511 \times \theta_3}{511^{n_a}}$$

Donde:

$n_a$  = índice de flujo en el espacio anular

$K_a$  = factor de consistencia en el espacio anular, [cp]

Velocidad del flujo en el espacio anular,  $V_a$

$$V_a = \frac{0.408 \times Q}{ID_{HOLE}^2 - OD_{DP}^2}$$

Donde:

$V_a$  = velocidad del fluido en el espacio anular [ft/seg].

$Q$  = gasto o tasa de flujo, [gpm]

$ID_{HOLE}$  = diámetro del agujero o diámetro interior de la TR, pulgadas

$OD_{DP}$  = diámetro exterior de la tubería de perforación o los lastra barrena, pulgadas

Viscosidad Efectiva

$$\mu_{ea} = 100 \times K_a \times \left( \frac{144 \times V_a}{ID_{HOLE} - OD_{DP}} \right)^{n_a - 1} \times \left( \frac{(2n_a + 1)}{3n_a} \right)^{n_a}$$

---

Donde:

$\mu_{ea}$  = viscosidad efectiva en el espacio anular, [cp]

$V_a$  = velocidad del fluido en el espacio anular [ft/seg].

$ID_{HOLE}$  = diámetro del agujero o diámetro interior de la TR, pulgadas

$OD_{DP}$  = diámetro exterior de la tubería de perforación o los lastra barrena, pulgadas

$n_a$  = índice de flujo en el espacio anular

$K_a$  = factor de consistencia en el espacio anular, [cp]

Numero Reynolds

$$Re_a = \frac{928 \times (ID_{HOLE} - OD_{dp}) \times V_a \times W}{\mu_{ea}}$$

Donde:

$Re_a$  = numero de Reynolds para el fluido en el espacio anular

$W$  = densidad del lodo, [ppg]

Régimen de Flujo y Número Crítico de Reynolds (en el espacio anular)

Para determinar un régimen de flujo, el valor obtenido para el número de Reynolds es comparado con los valores siguientes, basado en experimentos conducidos al observar el flujo de un fluido Newtoniano (en éste caso agua) a través de una tubería circular:

Re	Régimen de Flujo
< 2000	Flujo Laminar
2000 – 4000	Flujo Transitorio
>4000 Flujo	Turbulento

Sin embargo, debido a que los fluidos de perforación no se conforman con las propiedades de un real fluido Newtoniano, las siguientes ecuaciones han sido desarrolladas para determinar el número crítico de Reynolds, en el cual el régimen de flujo cambia de laminar a turbulento:

Flujo Laminar:  $Rec = 3470 - 1370n$

Flujo Transitorio:  $3470 - 1370n < Rec < 4270 - 1370n$

Flujo Turbulento:  $Rec = 4270 - 1370n$

Donde:

$Rec$  = numero critico Reynolds en una sección anular

$n$  = constante de la "Ley de Potencia" para el espacio anular

Gasto o tasa de flujo típico

Habiendo derivado el valor para el número crítico de Reynolds, es posible calcular la velocidad crítica y por lo tanto el gasto crítico de flujo, después del cual el flujo laminar comenzaría a romperse para pasar a un estado transitorio antes de llegar al régimen turbulento.

$$V_c = \left[ \frac{(3470 - 1370n)(100)K \left( \frac{2n+1}{3n} \right)^n}{928W(ID_{HOLE} - OD_{op}) \left( \frac{144}{ID_{HOLE} - OD_{DP}} \right)^{1-n}} \right]^{\frac{1}{2-n}}$$

Donde:

$V_c$  = velocidad anular crítica

$n$  = constantes de "Power Law" para el espacio anular

$W$  = densidad del lodo, [ppg]

$ID_{HOLE}$  = diámetro de agujero o ID de la TR, pulgadas

$OD_{DP}$  = diámetro exterior, ya sea de la tubería o de los acoples, pulgadas

El gasto crítico de fluido se puede entonces con la expresión:

$$Q_c = 2.45V_c(ID_{HOLE}^2 - OD_{DP}^2)$$

Donde:

$Q_c$  = gasto crítico de flujo, [gpm]

$V_c$  = velocidad anular crítica

$ID_{HOLE}$  = diámetro de agujero o ID de la TR, pulgadas

$OD_{DP}$  = diámetro exterior de la tubería o de los acoples, pulgadas

#### Pérdidas de Presión del Sistema

La lectura de presión de bombeo es la suma de todas las pérdidas de presión dentro del sistema. La mayoría de estas pérdidas de presión representan energía cinética desperdiciada, utilizada en vencer la fricción que experimenta el fluido cuando circula a través de restricciones en el sistema.

Algunas veces se refieren a ellas como pérdidas "parásitas" de presión. La caída de presión en la barrena es considerada sin embargo como una pérdida de presión útil.

P. Total = P. Superficie + P. Sarta de Perforación + P. Espacio Anular + P. Barrena

P. Sarta de Perforación = P. Tubería de Perforación + P. acoples + P. Herramientas de Fondo

Las pérdidas de presión son funciones de la velocidad de circulación (gasto o tasa de flujo), densidad del lodo, viscosidad, diámetro de la tubería, diámetro del agujero y longitud del sistema.

La máxima pérdida de fricción a vencer está gobernada por las limitaciones del equipo en superficie. El objetivo general al optimizar la hidráulica es el de minimizar las pérdidas de presión en el sistema y maximizar la potencia consumida en la barrena. La tabla siguiente ilustra el efecto de cambiar ciertas variables dentro del sistema hidráulico.

Variables	Perdidas del Sistema	Potencia en la Barrena
Menor tasa de flujo	Disminuyen	Disminuye
Mayor área de flujo (Ej. ID de tubería)	Disminuyen	Incrementa
Incremento de longitud de sistema	Incrementan	Disminuye
Menor peso del lodo	Disminuyen	Incrementa
Menor viscosidad	Disminuyen	Incrementa
Mayor área en las toberas	Disminuyen	Disminuye

El procedimiento general para calcular pérdidas de presión de sistema es:

1. Determinar la velocidad del fluido (o número Reynolds) en el punto de interés.
2. Calcular la velocidad crítica (o número de Reynolds) para determinar régimen de flujo.
3. Elegir la ecuación apropiada para la pérdida de presión (dependiendo de la elección del modelo reológico y del régimen de flujo en consideración).

#### Ecuaciones de Pérdidas de Presión

Como ha sido mencionado anteriormente, la elección del modelo reológico y el régimen de flujo del fluido de perforación, determinan cuál juego de ecuaciones de caída de presión deberá ser utilizado para calcular las pérdidas de presión del sistema.

Para un fluido con reología basada en la Ley de Potencia, la pérdida de presión al fluir por un conducto tubular una longitud  $L$ , será:

$$P_{Loss} = \frac{f \times V^2 \times W \times L}{25.81 \times D_{eff}}$$

Donde:

$P_{Loss}$  = pérdida de presión en el intervalo, [psi]

$F$  = factor de fricción, sin dimensión

$V$  = velocidad del fluido en el espacio anular o en la tubería, [ft/seg].

$W$  = densidad del lodo, [ppg]

$L$  = longitud del intervalo, [ft]

$D_{eff}$  = diámetro efectivo, pulgadas

$D_{eff \text{ tubería de Perforación}} = ID_{DP}$

$D_{eff \text{ Espacio Anular}} = ID_{hueco} - OD_{DP}$

El factor de presión ( $f$ ) utilizado en esta ecuación depende del régimen de flujo.

Para flujo turbulento

$$f = \frac{a}{Re^b}$$

---

---

Donde:

$$a = \frac{\log n + 3.393}{50} \quad b = \frac{1.75 - \log n}{7}$$

Para flujo laminar

$$f = \frac{16}{Re}$$

Optimización de la hidráulica del Sistema

No importa cuál sea el proceso de optimización utilizado (la fuerza de impacto del chorro o la potencia hidráulica consumida en la barrena), es importante recordar que las condiciones de máxima fuerza de impacto del chorro y potencia hidráulica, sólo son válidas para una profundidad dada. Sin embargo, desviaciones del 20% de la ideal de 65% o del 49% de la presión total de superficie no cambiarán significativamente la potencia hidráulica consumida o fuerza de impacto del chorro en la barrena. Esto permite tener fuerzas de impacto del chorro o potencias hidráulicas cercanas al máximo óptimo, a lo largo de un gran intervalo de profundidad, sin tener que cambiar el diámetro de las toberas.

Es generalmente, sin embargo, mejor optimizar la hidráulica al final de la corrida de la barrena para proveer una óptima limpieza de fondo, en donde sea más necesitada.

Sistema Básico

Un sistema hidráulico básico estaría formado solamente por la tubería de perforación, los acoples y la barrena. El proceso de optimización simple, para dicho sistema, incluirá los siguientes pasos:

- Se elige el equipo para mantener las pérdidas de sistema en un valor mínimo, para un rango de caudales de flujo y la profundidad anticipada.
- Se decide cuál método de optimización se quiere utilizar para la limpieza de fondo en cada intervalo. Por ejemplo, el modelo de fuerza de impacto del chorro para la parte superior del agujero y el método de potencia hidráulica para mayores profundidades.
- Se determine la tasa de flujo óptima para el sistema, al final del intervalo de corrida de la barrena.
- Se ajusta el flujo para cumplir con los requerimientos mínimos o limitaciones máximas.

Sistema con herramientas de fondo

La mayoría de los sistemas hidráulicos incluirán un arreglo o ensamblaje de herramientas de fondo, tales como motores de lodo, turbinas, registradores MWD y LWD, o similares. Estos hacen el proceso de optimización de la hidráulica, un poco más complicado que en el caso básico, ya que no puede ser modelado por medio de un juego de simples ecuaciones.

Existen dos formas de optimizar un sistema con herramientas de fondo. El método más directo es el de restar las pérdidas de presión esperadas para las herramientas de fondo de la presión de bombeo. Esta información deberá ser provista por los fabricantes o proveedores de los componentes de la herramienta. El resto del sistema, es entonces optimizado, utilizando el

---

---

valor menor de la presión de bombeo. Una de las desventajas de éste método, es que es difícil de predecir cuál será la pérdida de presión a través de las herramientas, ya que la tasa de flujo aún no se ha determinado.

El segundo método es el de optimizar el sistema como si no hubiera herramientas en la sarta de perforación. La presión requerida para las herramientas es entonces restada de la presión disponible en barrena. Los resultados de éste método dan una tasa de flujo más alta, con un área de tobera mayor que las del método 1. Debido a que ya conocemos la tasa de flujo, éste método dará una caída de presión exacta para las herramientas de fondo. Ambos métodos, sin embargo, proveen limpieza máxima de pozo.

#### Optimización de la hidráulica en la Barrena

El propósito de optimizar la hidráulica de la barrena es el de proveer máxima limpieza del pozo y velocidades óptimas de perforación, con un mínimo de potencia.

La hidráulica de la barrena será normalmente optimizada bien sea basada en la fuerza de impacto del chorro en el fondo o en la potencia hidráulica consumida en barrena. Lo adecuado para cada método y para una corrida de barrena en particular, dependerá altamente de experiencias previas en el área, la longitud o profundidad del agujero descubierto y las condiciones de fondo. En caso de que los datos de referencia del desempeño de barrena, se encuentren de alguna manera limitados y no se pueda llegar a ninguna conclusión, entonces la hidráulica se deberá optimizar al comienzo, por medio de la potencia hidráulica consumida en la barrena.

Sin embargo, y como regla general, en las secciones poco profundas y de mayor diámetro del agujero, en donde la velocidad de perforación es alta y son generados altos volúmenes de recortes, los caudales de flujo más altos son beneficiosos para la limpieza efectiva de pozo.

Optimizar la hidráulica con base en la fuerza de impacto de chorro, proveerá tasas de flujo en un 19.5% más altas que las calculadas con el método de potencia hidráulica.

En las secciones más profundas y de menor diámetro, en donde la velocidad de perforación es menor y las fuerzas estáticas y de cortes dinámicos de atrape hacia abajo se convierten la mayor preocupación hidráulica, las velocidades más altas de chorro y la presión de fondo, se vuelven críticas. Bajo estas condiciones, maximizar la potencia hidráulica, provee un 14.3% más de velocidades de chorro y un 34.7% más de presiones, que con el método de máxima fuerza de impacto del chorro sobre el fondo.

#### Caída de presión en la barrena

La caída de presión a través de una barrena, es definida como la diferencia entre la presión del lodo saliendo por las toberas y la presión del fluido que se encuentra dentro de la sarta de perforación, inmediatamente antes de entrar a la barrena. En caso de que la caída de presión en la barrena sea extremadamente alta para un gasto de flujo y un peso de lodo dado, el fluido que sale de las toberas, tendrá una velocidad alta, correspondiente. Por otro lado, una caída de presión baja bajo las mismas condiciones de flujo y peso de lodo, resultará en un fluido que sale de las toberas con una velocidad menor. La caída de presión depende del gasto de flujo, peso del lodo y del área total de flujo en la barrena.

$$P_{Bit} = \frac{Q^2 \times W}{12031 \times C_n^2 \times TFA^2}$$

Donde:

$P_{Bit}$  = caída de presión en la barrena, [psi]

Q = gasto o tasa de flujo, [gpm]

W = densidad del lodo, [ppg]

$C_n$  = coeficiente de descarga de las toberas, usualmente tomado como 0.95

TFA = área total de flujo, pulgadas cuadradas

#### Optimización de la potencia hidráulica consumida en la Barrena

Este método supone que la remoción de recortes depende de la cantidad de energía disipada producida por el fluido, en la barrena. Debido a esto, las velocidades óptimas de perforación serán alcanzadas cuando la potencia hidráulica por pulgada cuadrada ó HSI (Hydraulic Horsepower per Square Inch) consumida en la barrena, sea maximizada.

La HSI provee una medida de la potencia hidráulica consumida en la barrena y es una función del caudal o gasto de flujo y de la caída de presión en barrena, así como del diámetro del agujero y, por lo tanto, incrementará a medida que el gasto de flujo sea incrementado. Sin embargo, y medida que el gasto de flujo incrementa, el TFA necesitará eventualmente ser incrementado para mantener una caída de presión adecuada, en cuyo caso la HSI caerá una vez más.

La potencia hidráulica por unidad de área de barrena, está dada por:

$$HSI = \frac{Q \times P_{Bit}}{1714 \times A}$$

Donde:

HSI = potencia hidráulica consumida por pulgada cuadrada

$P_{Bit}$  = caída de presión en barrena, [psi]

Q = gasto de flujo, [gpm]

A = área del agujero ( $p/4 \times \text{diámetro del agujero}^2$ ), pulg. Cuadrada

Se considera que el HSI está en su punto máximo cuando la caída de presión a través de la barrena es de un 65% de la presión total disponible en superficie (presión de bombeo).

#### Optimización de la fuerza de impacto del chorro en el fondo

Este método de optimización supone que la limpieza de pozo es máxima cuando el fluido de perforación impacta la formación, con fuerza máxima. El método por lo general es aplicable para optimizar la hidráulica en las secciones de mayor diámetro y superficiales del agujero, en donde las formaciones son más blandas y la remoción de recortes se beneficia de la acción de chorro.

La fuerza de impacto de chorro (JIF) es la fuerza ejercida por el fluido al salir por las toberas, cuando la barrena está en el fondo. Es una función de la velocidad de chorro, la densidad del lodo y el gasto de flujo. La velocidad de chorro es el parámetro que gobierna éste método de optimización de la hidráulica de la barrena. A mayor velocidad de chorro, mayor será el efecto

---

---

de limpieza de pozo. El valor mínimo aceptado de velocidad del chorro para una limpieza de fondo optimizada, es aproximadamente de 350 [ft/seg].

$$JIF = \frac{Q \times W \times V_n}{1932}$$

Donde:

Q = gasto de flujo, [gpm]

W = densidad del lodo, [ppg]

Vn = velocidad del chorro, [ft/seg].

La fuerza de impacto de chorro se hace máxima cuando la caída de presión a través de la barrena es de un 40% del total de la presión disponible en superficie.

Hidráulica en el anular y la limpieza del pozo.

La habilidad del fluido de perforación de levantar los recortes, es afectada por varios factores, incluyendo la densidad del fluido y la reología, tamaño y excentricidad del espacio anular, velocidad anular y régimen de flujo, rotación de la tubería, densidad de los recortes, tamaño y forma de las partículas.

La relación entre los diferentes parámetros es complicada y ninguna teoría en particular o juego de ecuaciones, puede satisfactoriamente combinar todos los fenómenos observados. No obstante, el control de la generación y la velocidad de transporte de los recortes son factores imperativos para una operación de perforación exitosa.

Factores generales que afectan la limpieza del pozo

· Inclinación

Pozos verticales y cercanos a vertical – dentro de los agujeros, con una inclinación menor a los 30 grados, los recortes son efectivamente suspendidos por la fuerza cortante del fluido y las camas de recortes no llegan a formarse. En este caso la limpieza del pozo no es por lo general problemática, suponiendo que la reología del lodo es la adecuada.

Pozos desviados (inclinación mayor que 30 grados) – los recortes tienden a asentarse en el lado bajo del agujero formando camas de altura variable. Estas podrían ya sea migrar hacia arriba en el agujero o deslizarse hacia abajo, resultando en el empaclado del espacio anular.

· Reología

Condiciones de flujo laminar – el incremento de viscosidad del lodo mejora la limpieza del pozo. Es particularmente efectivo si la reología es de fuerza cortante bajo y los valores YP y PV son altos.

Condiciones de flujo turbulento – reducir la viscosidad ayudará a remover los recortes.

· Resistencia a la Cedencia ó Punto de Cedencia

---

---

Es una medición de las propiedades del esfuerzo cortante bajo de un sistema de lodos. El Punto de cedencia,  $P_c$ , gobierna el tamaño de los recortes que pueden ser dinámicamente suspendidas y transportadas en el fluido.

· Densidad del lodo

La densidad del lodo afecta la flotabilidad de los recortes perforados. Un sistema de lodos más pesado permite a los recortes "flotar" más fácilmente.

· Gasto o tasa de flujo

En pozos altamente desviados el gasto de flujo combinado con agitación mecánica son factores importantes para una limpieza efectiva del pozo. En los pozos verticales, la velocidad anular en incremento y/o las propiedades reológicas incrementadas, mejoraran la limpieza de pozo.

Velocidad de caída de los recortes

La velocidad de caída es aquella a la cual los recortes perforados caerán a través de la columna de lodo bajo la influencia de la gravedad. En el caso más simple y para poder remover los recortes perforados con efectividad, la velocidad del fluido en el espacio anular, deberá exceder dicha velocidad de caída. La situación se hace más complicada por las condiciones de flujo y fricción, junto con muchos de los otros factores mencionados anteriormente. Por ejemplo, y bajo condiciones de flujo laminar, las partículas en el centro de la columna de lodo se moverán a una velocidad mayor a la velocidad anular promedio y serán recuperados en superficie más rápido de lo esperado. Sin embargo, las fuerzas creadas por la fricción entre las paredes del agujero o tubería de revestimiento y el fluido hacen que los recortes perforados en esa región se muevan hacia arriba a una velocidad menor que la velocidad anular promedio. En contraste con esto, si se tiene flujo turbulento en el anular y si la velocidad del fluido excede la velocidad de caída de las partículas, los sólidos serán removidos en forma continua en todas las partes del espacio anular.

Debido a ello el flujo turbulento provee una mayor limpieza del pozo que el flujo laminar, aunque es menos deseable debido a las posibilidades que se tienen de erosionar las paredes del agujero.

Como norma general, es recomendado que la velocidad de caída sea menos de la mitad de la velocidad anular (promediada sobre el área seccional).

Como ya fue indicado, la relación entre los distintos factores que afectan la velocidad de caída de los recortes es compleja y aunque se han desarrollado algunos métodos para estimar su valor, ninguno de ellos es considerado como definitivo. Los métodos más acertados se basan en el número de Reynolds para partículas, el coeficiente de arrastre, la densidad de las partículas, su forma y su tamaño y así como en la densidad de lodo y su reología.

El siguiente ejemplo, basado en una correlación ideada por Walker y Mayes en 1975, es un método simplificado.

---

---

Paso 1: Se calcula el esfuerzo cortante desarrollado por las partículas

$$t_p = 7.9 \times \sqrt{T \times (20.8 - W)}$$

Donde:

$t_p$  = esfuerzo cortante de las partículas, [lb/100ft<sup>2</sup>]

T = grosor de las partículas, pulgadas

W = densidad del lodo, [ppg]

La tabla a continuación provee una aproximación al grosor y diámetros de partículas en forma de disco:

Velocidad de Perforación esperada (pies/hora)	Grosor de las partículas (pulgadas)	Diámetro de las partículas (pulgadas)
≥ 60	0.3	0.6
30 – 60	0.2	0.3
15 – 30	0.1	0.4
≤ 15	0.1	0.3

Paso 2: Se determina el límite de la tasa de cizalladura

El límite de cizalladura es como una velocidad crítica de corte. Las velocidades del esfuerzo cortante de las partículas por encima dicho valor crítico son tratadas en los cálculos para condiciones turbulentas. Las velocidades de esfuerzo cortante que siguen utilizan cálculos laminares. Las condiciones turbulentas o laminares de las partículas no están relacionadas a la condición de flujo turbulento o laminar del fluido dentro del espacio anular.

$$\gamma_b = \frac{186}{d_p \times \sqrt{W}}$$

Donde:

$\gamma_b$  = límite de gasto de esfuerzo cortante, [seg<sup>-1</sup>]

$d_p$  = diámetro de las partículas, pulgadas

W = densidad del lodo, [ppg]

Paso 3: Se calcula la velocidad del esfuerzo cortante desarrollado por la partícula utilizando las constantes para flujo laminar ( $n_a$  y  $K_a$ ) para el lodo según la "Ley de Potencia"

$$\gamma_b = \frac{\frac{1}{t_p^{n_a}}}{K_a}$$

---

Donde:

$\gamma_b$  = gasto de esfuerzo cortante de las partículas, [seg<sup>-1</sup>]

$t_p$  = esfuerzo cortante de las partículas desde el paso 1, [lb/100ft<sup>2</sup>]

$n_a$  = índice de flujo en el espacio anular

$K_a$  = factor de consistencia en el espacio anular, [cp]

Paso 4: Se determina la velocidad de caída para la condición laminar o turbulenta.

Condición Laminar

Si  $g_p < g_b$ , la velocidad de caída es determinada por:

$$V_s = 1.22 \times t_p \sqrt{\frac{\gamma_p \times d_p}{W}}$$

Donde:

$V_s$  = velocidad de la corrida, [ft/min].

$\gamma_p$  = gasto de esfuerzo cortante de las partículas, [seg<sup>-1</sup>]

$t_p$  = esfuerzo cortante de las partículas desde, [lb/100ft<sup>2</sup>]

$d_p$  = diámetro de las partículas, pulgadas

$W$  = densidad del lodo, [ppg]

Condición Turbulenta

Si  $g_p > g_b$ , la velocidad de caída es determinada por:

$$V_s = \frac{16.62 \times t_p}{\sqrt{W}}$$

Donde:

$V_s$  = velocidad de la corrida, [ft/min].

$t_p$  = esfuerzo cortante de las partículas desde, [lb/100ft<sup>2</sup>]

$W$  = densidad del lodo, [ppg]

Velocidad de transporte de los recortes

La velocidad de transporte de los recortes para cada una de las geometrías de un agujero, es obtenida restando la velocidad de caída de los recortes de la velocidad anular, para esa sección en particular.

$$V_t = V_a - V_s$$

Donde:

$V_t$  = transporte de recortes, [ft/min].

$V_a$  = velocidad anular, [ft/min].

$V_s$  = velocidad de corrida, [ft/min].

---

---

### Eficiencia de Transporte de los Recortes

Quizás aún más importante que la velocidad de transporte real de los recortes, es la eficiencia de transporte de los mismos. Esto es simplemente la relación entre la velocidad de transporte de recortes a la velocidad del fluido en el espacio anular. Nótese que la ecuación que se muestra a continuación es válida sólo para ángulos menores a los 30 grados. La evaluación de la limpieza de para pozos con inclinaciones mayores es mucho más complicada ya que los recortes perforados podrían formar camas de recortes en la parte baja del agujero.

$$E_t = \frac{V_t}{V_a} \times 100$$

Donde:

Et = eficiencia de transporte, %

Vt = transporte de recortes, [ft/min].

Va = velocidad anular, [ft/min].

### Concentración de recortes

Nota: valido solamente para pozos con ángulos menores a los 30 grados.

La concentración de recortes en el espacio anular depende de la eficiencia de transporte así como del gasto de flujo volumétrico y de la velocidad a la que se generan los recortes en la barrena (dependiendo de la ROP y del tamaño del agujero). La experiencia ha demostrado que el exceso de concentración de recortes, en cuatro o cinco veces de volumen porcentual, puede llevar al empacamiento, al agujero estrecho o a incidentes de atrapamiento de tubería. Cuando se perforan formaciones blandas la concentración de recortes puede fácilmente exceder en un 5% por volumen, si las velocidades de perforación no son controladas. Algunos operadores recomiendan una concertación máxima de recortes de 4% por volumen.

La concentración de recortes es dada por:

$$C_a = \frac{ROP \times ID_{HOLE}}{14.71 \times E_t \times Q} \times 100$$

Donde:

Ca = concentración de recortes, vol %

ROP = velocidad de perforación, [ft/hrs]

IDHOLE = diámetro del agujero, pulgadas

Et = eficiencia de transporte, %

Q = gasto de flujo, [gpm]

Cuando la concentración de recortes exceda al 4% ó al 5% por volumen, el efecto sobre la presión hidrostática y la densidad equivalente de circulación puede ser sustancial. El cambio en a presión hidrostática depende de la densidad de los recortes al igual que de su concentración, para esa sección del agujero en particular.

---

---

La densidad efectiva del lodo debido a la concentración de recortes en esa sección del agujero, es dada por:

$$We = \left( SG \times 8.34 \times \frac{Ca}{100} \right) + \frac{W(1 - Ca)}{100}$$

Donde:

We = peso efectivo del lodo, [ppg]

SGc = gravedad específica de los recortes

Ca = concentración de recortes, vol %

W = densidad del lodo, [ppg]

El efecto es más pronunciado cuando se perforan las secciones superiores del agujero. Las siguientes condiciones causan un incremento en la concentración de recortes:

- Los agujeros de gran diámetro perforados a un alta ROP.
- Las bombas no son capaces de proveer suficientes velocidades anulares.
- una rápida velocidad de preparación del volumen de lodos podría producir viscosidad insuficiente.

Queda claro que un incremento en las concentraciones de recortes en el espacio anular, resultará en un incremento correspondiente de la densidad del lodo.

Densidad Equivalente de Circulación (ECD)

Cuando el fluido de perforación está circulando a través del pozo, la presión de circulación debe ser suficiente para superar, no solamente las pérdidas de fricción a través de la sarta de perforación y la barrena, sino también la presión hidrostática del fluido en el espacio anular y las pérdidas de presión por fricción del fluido al moverse a través del espacio anular. La presión requerida para superar las pérdidas totales por fricción en el espacio anular, sumada a la presión hidrostática del fluido, dará como resultado la densidad circulante equivalente, como sigue:

$$ECD = \frac{\sum Pa + W}{0.052 \times TVD}$$

Donde:

ECD = densidad equivalente de circulación, [ppg]

$\sum Pa$  = suma de las pérdidas de presión por fricción en el espacio anular, corresponde a la presión de bombeo menos las pérdidas de presión a través del equipo en superficie, la sarta de perforación y la barrena, psi.

TVD = profundidad vertical verdadera del agujero, [pies]

W = densidad del lodo, [ppg]

La mayoría de las situaciones de perforación, probablemente no se encuentren limitadas por la ECD friccional. La excepción sería el caso de perforación de agujeros estrechos. La ECD es

---

---

particularmente agravada al perforar pozos estrechos y profundos, utilizando altos pesos de lodo, cerca de la presión de fractura de la formación. Se recomienda reducir los gastos de flujo seleccionados para prevenir una pérdida de circulación por exceso de ECD.

#### Densidad Equivalente de Circulación (ECD) con recortes

Una descripción completa de la presión adicional a la cual se encuentra expuesto el agujero descubierto, combina el efecto de la fricción (ECD) ya discutida y el efecto de la carga de recortes en el espacio anular (densidad efectiva del lodo).

$$ECD + Cuttings = \frac{\Sigma P_a}{0.052 \times TVD} + \left( SG_c \times 8.34 \times \frac{C_a}{100} \right) + \frac{(1-C_a)}{100}$$

Donde:

ECD = densidad circulante equivalente, [ppg]

$\Sigma P_a$  = suma de pérdidas de presión por fricción en el espacio anular, [psi]

TVD = profundidad vertical verdadera del agujero, [pies]

SGc = gravedad específica de los recortes

Ca = concentración de los recortes, vol %

W = densidad del lodo, ppg

#### Directrices para limpieza de pozos

##### Directrices para pozos verticales

- La reología es muy importante para el transporte de recortes en pozos verticales o desviados. En particular los pozos de gran diámetro que no se pueden limpiar sólo con velocidad. Suponiendo que la reología del lodo es correcta, la limpieza de éste tipo de pozos por lo general no representa un problema. Por lo general, la velocidad anular es mayor que la velocidad de caída de los recortes y de esta manera se pueden remover del agujero de manera efectiva. Para asegurar que se logra una velocidad de caída baja, estos pozos son usualmente perforados con sistemas de lodo viscoso y con un alto punto de cedencia.
- Circular por lo menos 1.3 veces los fondos arriba para pozos verticales. Observar los retornos en las temblorinas, asegurándose de que el gasto de retorno ha disminuido a niveles aceptables, antes de comenzar a hacer un viaje de tubería
- Limitar el uso de píldoras de alta viscosidad. A cambio, ajustar las propiedades del sistema activo para proveer una limpieza óptima del pozo. Las píldoras viscosas no se deberán usar en pozos verticales.
- Antes de comenzar el viaje es preferible reciprocarse en vez de rotar la tubería. Esto ayuda a remover los recortes de zonas estancadas, cerca de la pared del pozo.

La velocidad anular en pozos verticales es por lo general mucho más alta que la velocidad de caída de los recortes y ellos son removidos en forma efectiva del espacio anular.

---

· Tensionar a través de sitios estrechos, únicamente si la tubería está libre al bajar. Establecer un máximo permitido de sobre-tensión con anticipación y trabajar en forma progresiva hacia dicho máximo, asegurándose de que la tubería esté libre de moverse hacia abajo, en cada ocasión.

Parar la circulación en caso de que la sobre-tensión se vuelva excesiva.

· Repasar hacia arriba sólo en caso de ser absolutamente necesario. El repaso hacia arriba podría resultar en el empacamiento del agujero y atrapamiento de tubería. También podría enmarcar el inicio de serios problemas con el agujero, que pudieron haber sido detectados en una etapa anterior, en caso de que no se hubiera relimpiado hacia arriba.

Directrices para pozos desviados y de alcance extendido

Las medidas mencionadas anteriormente son también válidas para la limpieza efectiva de pozos desviados. Sin embargo, la geometría de pozos desviados o de alcance extendido hace que la limpieza de pozo sea más difícil que para los verticales o casi verticales. Muchos de los problemas encontrados son asociados con la naturaleza de las camas de recortes que se forman en la parte baja del agujero.

En los pozos desviados los recortes se deslizarán hacia la parte baja del agujero. En esta situación, la velocidad del fluido de perforación debe ser más alta para mantener a los recortes moviéndose hacia la superficie.

Secciones de bajo ángulo (10° - 40°)

Características de las Capas de Recortes

Las camas de recortes se forman en la parte baja del agujero y están al "reciclaje de partículas", lo cual tiene un efecto perjudicial en la limpieza de pozo.

1. Debido al incremento de la inclinación, el recorte es forzado hacia la parte baja del espacio anular en donde viaja hacia abajo, debido a la falta de fuerza de levantamiento en el flujo, baja velocidad cerca de la pared.
2. En algún punto y debido al esfuerzo cortante más alto el recorte es levantado y vuelve a entrar la región de alta velocidad en la mitad del espacio anular.
3. Entonces es arrastrado hacia arriba y continuara viajando hasta que
4. su tendencia a caer vence a la fuerza de levantamiento en el flujo y es forzado, nuevamente, hacia la parte baja del espacio anular.

Este proceso se puede repetir muchas veces, resultando en la alteración de la forma de los recortes a través del molido. Las mediciones utilizadas para reducir dicho problema incluyen el barrido con píldoras viscosas.

Comparado con las secciones verticales, las secciones de ángulo bajo, requieren velocidades anulares más altas para una limpieza de pozo eficiente. Para éste tipo de sección de pozo, el flujo laminar, domina el transporte de recortes. Debido a ello la viscosidad, el punto de cedencia

---

---

y las fuerzas iniciales del gel, tienen un efecto significativo en las concentraciones de recortes anulares y en la eficiencia de limpieza del pozo.

Directrices para el campo:

- Uso general del flujo laminar.
- Mantener un punto de cedencia y fuerza de gel altos, para reducir el asentamiento de los recortes, cuando las bombas estén apagadas.
- Asegurarse siempre de que el pozo está limpio, antes de apagar las bombas.
- Conseguir un valor máximo de la relación  $P_c/V_p$
- Utilizar limpiadores viscosos para reducir el efecto de reciclaje de partículas.

Secciones de Angulo Crítico ( $40^\circ - 60^\circ$ )

Características de las camas de Recortes

En secciones de pozo con inclinaciones mayores a los 40 grados, los recortes no se reciclan tan rápidamente como en las secciones de ángulo bajo. Esto se debe a que la gravedad tiende a mantenerlos abajo, hacia la parte baja del agujero.

Las secciones de pozo con inclinaciones entre 40 y 60 grados, son considerados críticos, no solamente porque las capas de recortes se desarrollan, pero también porque es inestable y propenso a deslizarse hacia abajo (avalancha).

La consecuencia de la avalancha, es un instantáneo desarrollo de recortes alrededor de la tubería de perforación y/o BHA el cual, si no es tratado apropiadamente, puede resultar en el atrapamiento de tubería. Además,

- El flujo turbulento exhibe efectos de erosión sobre las camas de recortes.
- El movimiento de la tubería de rotación ó reciprocación perturba mecánicamente las camas de recortes.

Directrices para el campo:

En las secciones de pozo por encima de los 40 grados, se debe enfocar la atención a disminuir la formación de camas de recortes.

· Para el rango de inclinaciones intermedias ( $40^\circ - 60^\circ$ ) el flujo turbulento es recomendado. Debido a que los recortes se transportan en flujo turbulento que no está afectado por propiedades reológicas se pueden utilizar parámetros más bajos de lodo ( $P_c$ ,  $V_p$ ). Sin embargo, los parámetros estáticos del lodo, como la fuerza gel, son usualmente deseables aún cuando un flujo turbulento sea preferible. En caso de que el flujo turbulento no pueda ser utilizado debido a otros factores adversos como por ejemplo la inestabilidad del pozo, la velocidad anular deberá ser mantenida tan alta como sea posible.

· La rotación y/o reciprocación de la tubería de perforación tienen una influencia destructiva en las camas de recortes esta influencia es el factor principal que provee un mayor grado de limpieza para RPM más altas. Debido a que la rotación de la tubería es típicamente gobernada

---

---

por las necesidades de perforación direccional se deberán considerar viajes de limpieza periódicos.

- Las combinaciones de limpiadores de alta y baja viscosidad, son efectivas erosionando las camas de recortes y transportando los recortes a la superficie.

#### Características de las Capas de Recortes

En secciones de alto ángulo de inclinación la formación de camas de recortes es casi instantánea y su espesor es gobernado principalmente por la velocidad anular. Las camas de recortes que se forman en ángulos mayores a los 60 grados son estables en el sentido que no se producirá una avalancha. El ondeo, tipo vórtice, característico de los flujos turbulentos, tienen una influencia destructiva en la cama de recortes que se está formando. Existe una tendencia a que los recortes sean levantados de la cama y desplazados hacia arriba por el espacio anular donde un proceso similar podría volver a ocurrir. Este tipo de interacción, junto con el perfil de velocidad plana típico del flujo turbulento, conlleva a una mayor limpieza de pozo.

El movimiento de la tubería de rotación o reciprocación, perturba mecánicamente las camas de recortes.

Directrices para el campo:

- Para los pozos de alto ángulo el flujo turbulento es preferible. Generalmente son aplicables en ellos las mismas recomendaciones descritas para pozo de ángulo intermedio cuando se tiene régimen turbulento de flujo. Sin embargo, los requisitos para asegurar la fuerza gel del lodo, son menos importantes. En caso de que no se pueda encontrar flujo turbulento la proporción de  $P_c/V_p$  deberá ser mantenida lo más alto posible.

- Una vez más, la rotación y/o reciprocación de la tubería de perforación tienen una influencia destructiva en las camas de recortes. Es esta influencia provee un grado de limpieza mayor para altas RPM particularmente en pozos de alto ángulo en donde se habrán formado camas de recortes considerables. La rotación de tubería a velocidades mayores que 120 [rpm] es altamente recomendable. Se deberán efectuar viajes periódicos con limpiadores en caso de que la rotación de la tubería de perforación sea restringida. El uso de herramientas direccionales navegables con rotación podría resultar de ayuda.

- La combinación de píldoras limpiadoras de alta y de baja viscosidad es efectiva para erosionar las camas de recortes y transportar los mismos a la superficie. La efectividad del programa de eliminación de camas de recortes se puede determinar a través de varios indicadores.

#### Indicadores de una limpieza pobre del pozo

Un número de indicadores en la superficie se pueden utilizar como guías de la efectividad en la limpieza de pozo. Estos incluyen:

- Forma y tamaño de los recortes en las temblorinas - recortes pequeños de forma redonda bien definida, podrían indicar períodos extensos de remolienda en el fondo del pozo – una indicación de la formación de camas de recortes.

- La velocidad de retorno de los recortes vs. el volumen esperado.

- 
- 
- Incremento en la torsión y arrastre de la sarta perforando o al hacer conexiones
  - Mayor peso que el normal al levantar la sarta.
  - Pobre transferencia de peso sobre la barrena. Se requiere de un un peso mayor al normal en superficie para conseguir una respuesta de caída de presión del motor de lodos y avanzar el pozo.
  - Dificultad para orientar el motor, debido al exceso de fricción entre los recortes y la sarta de perforación.
  - Exceso de recortes en el fondo, debido a un reciclaje extendido de partículas e interacción de la sarta de perforación con las camas de recortes.

#### Efectos del tipo de lodo sobre la eficiencia de limpieza del Pozo

- En pozos altamente desviados y para valores menores del punto de cedencia y de la viscosidad plástica el desempeño de limpieza para ambos tipos de lodo es básicamente el mismo. Sin embargo, con valores más altos de  $P_c$  y  $V_p$  los lodos base agua proveerán una mejor limpieza. La observación general es que un incremento en el punto de cedencia del lodo y de la viscosidad plástica resultara en un incremento de concentración de recortes para ambos lodos.
- Como resultado de estas concentraciones más altas de los recortes, los requerimientos de torsión para ambos tipos de lodo se incrementarán al aumentar el  $P_c$  y la  $V_p$  en agujeros de mayor inclinación.
- El desempeño de limpieza de pozos de lodos con base aceite a ángulos críticos (40 a 60 grados), es reducido por avalanchas severas de camas de recortes (debido a la reducción de fricción).

#### Factores que pueden ayudar en la limpieza del pozo

La reología del lodo, densidad, velocidad anular y movimiento de la tubería, son vistos como la clave para el éxito de la limpieza eficiente del pozo. La importancia de las prácticas operacionales acertadas y la observación vigilante de la condición del pozo no se deben subestimar. Sin embargo, existen herramientas que si se utilizan adecuadamente, pueden ayudar y probablemente mitigar los problemas presentes de limpieza del pozo.

- Paquetes de programas electrónicos para la evaluar la limpieza del pozo, pueden ser utilizados para predecir la probabilidad y potencial localización del desarrollo de cualquier cama de recortes.

Deberán ser utilizados con cuidado, asegurándose que los resultados estén combinados con experiencias anteriores o información de pozos vecinos o de referencia.

- Impulsores de camas de Recortes, "mejoradores del desempeño" de la tubería de perforación y agitadores. Levantarán y retirarán los recortes de la parte baja del agujero hacia el área de alta velocidad anular. Pero a menos que la reología del lodo y otras condiciones sean suficientes, es probable que se salgan de la suspensión y formen de nuevo camas de recortes más arriba en el agujero.

---

---

· Herramientas de "Presión Durante la Perforación"

En años recientes se han desarrollado herramientas que permiten mediciones de presión de fondo en tiempo real. La herramienta de "Presión Durante la Perforación (PWD) da una indicación de cualquier cambio en la densidad equivalente de circulación. Las herramientas PWD tienen una cantidad de potenciales aplicaciones, incluyendo:

- Pruebas de goteo o de fuga (LOT)
- Detección de pérdidas de circulación
- Detección y vigilancia del flujo retornando del pozo y de influjos de la formación
- Información de presiones de suabeo y surgencia
- Vigilancia de las propiedades del lodo
- Mediciones de la presión diferencial para la optimización del desempeño de perforación en general.
- Perforación en bajo balance o des-balanceada.
- Vigilancia de la limpieza y estabilidad del pozo

Por medio de la medición exacta de ECD durante la perforación estas herramientas le permiten al supervisor establecer la condición del agujero antes de que ocurran serios problemas de limpieza de pozo.

#### Modelos Reológicos

Un modelo reológico es una descripción de la relación entre el esfuerzo cortante ( $t$ ) experimentado por el fluido y la velocidad de cambio de dicho esfuerzo cortante ( $\dot{\gamma}$ ). Debido a que la reología del fluido de perforación afecta directamente las pérdidas de presión del sistema de circulación, mientras más exactos sean los modelos reológicos utilizados para describir el flujo de los fluidos de perforación más preciso será el análisis hidráulico.

La descripción reológica de los fluidos ha sido expresada mediante relaciones matemáticas complejas. Algunas de las relaciones empleadas para describir el comportamiento de estos fluidos han sido aplicadas al comportamiento reológico de los fluidos de perforación, terminación y reparación de pozos petroleros.

- ✓ Modelo Newtoniano.
- ✓ Modelo Plástico de Bingham.
- ✓ Modelo de Ley de Potencias.
- ✓ Máselo de la Ley de Potencias con punto de cedencia

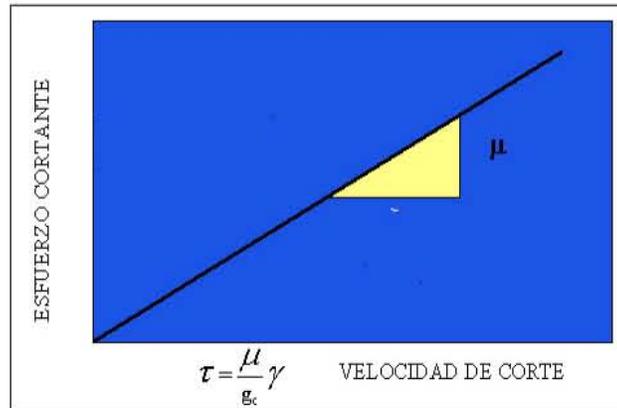
Otros modelos complejos:

- ✓ Modelo de Ellis.
- ✓ Modelo de Reiner-Philippoff.

---

### Modelo de Newton

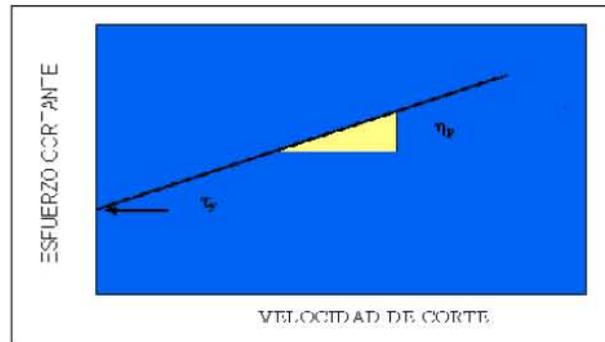
Este modelo propuesto por Newton, representa a los fluidos ideales. La constante de proporcionalidad, conocida como coeficiente de viscosidad o simplemente viscosidad, es suficiente para describir su comportamiento de flujo y matemáticamente, esta relación se expresa como:



Esta viscosidad permanece constante a cualquier velocidad de corte; siempre y cuando el flujo sea laminar y las propiedades del fluido permanezcan inalterables.

### Modelo Plastico de Bingham

Este tipo de fluidos es el más simple de todos los fluidos no-Newtonianos, debido a que la relación entre el esfuerzo y la velocidad de corte exhiben una proporcionalidad directa, una vez que un esfuerzo inicial finito, ha sido excedido iniciará el movimiento.



---

A este esfuerzo inicial se le denomina punto de cedencia,  $\tau_y$ ; en tanto que la pendiente de la porción lineal del reograma es conocida como coeficiente de rigidez o simplemente viscosidad plástica,  $\eta_p$ .

El modelo de Bingham está representado como:

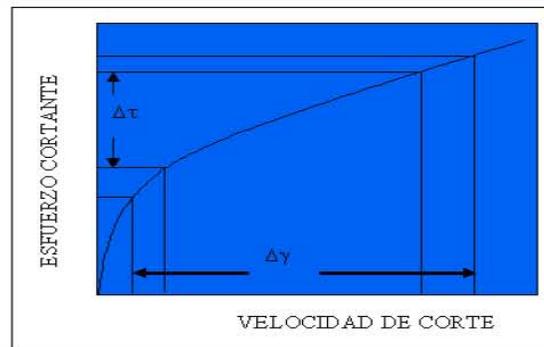
$$\tau = \frac{\eta_p}{g_c} \dot{\gamma} + \tau_y$$

Aunque este modelo es un caso idealizado, el flujo de fluidos de perforación en espacios anulares, asemejan su comportamiento de flujo a este modelo.

Modelo de Ley de Potencias

Es uno de los más usados en el campo de la ingeniería y una de las primeras relaciones propuestas entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte. Esta relación está caracterizada por dos constantes reológicas y expresada como:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n$$



En donde el índice de consistencia K, es un término semejante a la viscosidad e indicativo de la consistencia del fluido; es decir, si el valor de K es alto, el fluido es más "viscoso" y viceversa.

En donde el índice de consistencia K, es un término semejante a la viscosidad e indicativo de la consistencia del fluido; es decir, si el valor de K es alto, el fluido es más "viscoso" y viceversa.

En tanto que el índice de comportamiento de flujo n, es una medida de la no-Newtonianidad del fluido, entre más alejado de la unidad sea el valor de n, más no-Newtoniano es el comportamiento del fluido.

---

Si el valor de  $n$  es mayor que cero y menor que la unidad, el modelo representa a los fluidos seudoplásticos; en tanto que si  $n$  es mayor que la unidad, el modelo representa a los fluidos dilatantes. Nótese que este modelo se reduce a la Ley de la Viscosidad de Newton, si  $n$  es igual a la unidad, con  $K = \mu/gc$ .

#### Ley de Potencias Modificado

También conocido como modelo de Ley de Potencias con punto de cedencia, fue propuesto con el fin de obtener una relación más estrecha entre el modelo reológico y las propiedades de flujo de los fluidos seudoplásticos y dilatantes que presentan un punto de cedencia.

$$\tau = K\gamma^n + \tau_y$$



---

# Capitulo 4

**MANEJO DE SEGURIDAD DE LOS PRODUCTOS**

**QUÍMICOS EN LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN.**

---

---

### **Identificación de productos químicos**

Desarrollo de un índice de productos químicos, sus componentes, parámetros de marcación e identificación de acuerdo con los estándares aplicables.

### **MSDS - Hojas de Datos de Seguridad de Materiales**

Estos documentos son necesarios para que las personas que requieren hacer algún manejo de productos químicos conozcan los riesgos y puedan trabajar con seguridad.

### **Almacenamiento**

Debido a las diferentes características y comportamiento de los productos químicos, su almacenamiento apropiado es una necesidad. Esta fase cubre las necesidades de instalaciones, particularidades de almacenamiento y matrices de compatibilidad entre productos.

El objeto de esta fase es evitar situaciones en las cuales la fuga de una sustancia por derrames o roturas de envase ocasione la mezcla accidental con sustancias incompatibles y se generen situaciones graves como reacciones violentas, incendios, explosiones o emanación de gases venenosos o corrosivos.

### **Transporte**

De acuerdo con los productos químicos que se manejan, las leyes y otras normas aplicables, establecen las condiciones de transporte requeridas para cada uno de estos productos y mitigar sus riesgos.

### **Requisitos para contratistas**

Este es un punto de importancia crítica dentro del programa, ya que en muchos de los accidentes que ocurren con productos químicos hay proveedores involucrados. En esta fase se definen los compromisos de manipulación y otros requisitos que aseguren un buen desempeño.

### **Capacitación de personal**

Como en todas las actividades de perforación, la competencia de las personas es lo más importante. Esta fase define los requisitos de capacitación del personal involucrado en el manejo y aplicación de sustancias químicas.

### **Plan de contingencia**

Aunque todos los accidentes son evitables, estos desafortunadamente ocurren y hay que contar con planes para mitigar el daño y las pérdidas que estos generan. Esta fase define los posibles escenarios de accidente y los planes a seguir en caso de emergencia.

---

---

### **Clasificación de materiales Químicos en Función de su estado Físico**

Líquido: agua, diesel, aceite y aceite mineral.

Sólido: arcillas, bentonita, barita, sales solubles, sales insolubles, polímeros solubles y almidones.

Gases: nitrógeno, aire y CO<sub>2</sub>.

El material más importante es el agua, ya que es un componente de nuestra naturaleza el cual se compone por tres átomos, dos de hidrógeno y uno de oxígeno que unidos entre sí forman una molécula de agua H<sub>2</sub>O. La forma en que estas moléculas se unen entre sí determinan la forma en que encontramos el agua en nuestro entorno, como líquidos: en lluvias, ríos. Como sólidos en témpanos y nieves o como gas en nubes y vapor.

Existen diferentes tipos de agua de acuerdo a su procedencia y uso:

**Agua Potable:** es agua que puede ser consumida por personas y animales sin riesgo de contraer enfermedades.

**Agua Salada:** agua en la que la concentración de sales es relativamente alta (más de 10 000 mg/l)

**Agua de mar:** es una solución basada en agua que compone los océanos y mares de la tierra.

**Agua Salobre:** agua que contiene sal en una proporción menor que el agua marina. La concentración de sales disueltas está generalmente comprendida entre 1 000 -10 000mg/l. este tipo de agua no está contenida entre las categorías de agua salada y agua dulce.

**Agua Dulce:** agua natural con una baja concentración de sales, generalmente considerada adecuada, previo tratamiento para producir agua potable.

**Agua Dura:** agua que contiene un gran número de iones positivos. La dureza está determinada por el número de átomos de calcio y magnesio presentes.

**Agua Blanda:** agua sin dureza significativa.

**Aguas Grises:** aguas domésticas residuales en un sistema alcantarillado, que contiene materia orgánica disuelta o suspendida.

**Aguas Residuales:** fluidos residuales en un sistema de alcantarillado, que contiene materia orgánica disuelta o suspendida.

Estos tipos de agua se utilizarán dependiendo de la salud de los trabajadores y el costo.

Generalmente existen peligros que hay que disminuir teniendo un buen control de los materiales que ocupamos al perforar, tomando en cuenta el costo, seguridad, protección del medio ambiente, almacenamiento y transporte.

### **Protección del cuerpo**

Los diferentes peligros del trabajo requieren el uso de diferentes tipos de ropa de protección. La finalidad del diseño de vestimenta especial para los riesgos de exposición a productos químicos corrosivos, llamaradas de arcos eléctricos, fuego, y metales fundidos, es de reducir sus efectos dañinos.

---

---

Para protegerse propiamente, un trabajador debe entender las limitaciones de los tipos diferentes de ropa de protección. Se puede ofrecer una gran cantidad de protección en una emergencia.

#### **Ropa Para Uso Rutinario**

Debido a los riesgos inherentes en las instalaciones de perforación, la ropa y equipo de protección mínima que todo trabajador siempre debe llevar incluye:

- ✓ La ropa de trabajo de uso general suministrado por la compañía o una camisa de 100% algodón con mangas largas y pantalones, o bien overoles de 100% algodón;
- ✓ Casco de Clase G o E (o equivalente Clase A o B de ANSI);
- ✓ Anteojos con lentes de seguridad y protección lateral;
- ✓ Calzado de seguridad hecho de material que es resistente al aceite y productos hidrocarburos, con suelas antiderrapantes.
- ✓ Guantes de cuero u otro material de protección contra la abrasión, cuando sean necesarios.

#### **Ropa de Protección Química**

Las recomendaciones para la ropa de protección química deben ser basadas en los riesgos específicos, y tareas realizadas. Un solo tipo de ropa de protección química no puede ser adecuado para todos los químicos o sustancias. Líquidos de componentes múltiples o mezclas pueden presentar problemas especiales. Aun cuando la ropa de protección sea considerada resistente para el químico principal, la presencia de una cantidad pequeña de algún otro químico en la mezcla puede proporcionar un camino para acelerar la infiltración del químico principal.

La ropa de protección química puede ser del tipo que se llama "de encapsulación" (impermeable a gases) o del tipo "no encapsulando." La ropa de encapsulación total proporciona el nivel más alto de protección contra los riesgos químicos.

Se clasifica el equipo de protección personal en una de las cuatro categorías (A, B, C, D), con diferentes niveles de protección.

La ropa de protección química del nivel A: generalmente consiste de ropa de encapsulación total. Los otros niveles de ropa químicamente resistente generalmente son del tipo "no encapsulando." Se debe de recordar que la ropa protectora debe usarse con la protección respiratoria apropiada.

Ropa químicamente resistente del tipo "no encapsulando" consiste de varias piezas de ropa y equipo diseñado para proporcionar protección para la piel y los ojos contra las salpicaduras químicas. Esta no proporciona protección para todo el cuerpo contra los gases, polvos en el aire, y vapores, para este tipo de factores se requiere lo siguiente:

- ✓ Protección de los ojos y la cara – anteojos con lentes de seguridad, gafas químicas, gafas impermeables a vapores, careta, capucha resistente a ácidos (usado con gafas y casco), o respirador de cara completa.
- ✓ Protección para todo el cuerpo – chaleco y pantalones o overoles (con o sin capucha) con diseño para prevenir contacto directo con químicos líquidos o sólidos.
- ✓ Protección de las manos – guantes que son químicamente resistentes para proteger las manos contra contacto con químicos líquidos o sólidos.

- 
- ✓ Calzado de protección – botas o cubre botas para proteger los pies contra contacto con químicos líquidos o sólidos.

---

# CONCLUSIONES.

---

---

## CONCLUSIONES.

Es importante seleccionar los fluidos de perforación de acuerdo con sus funciones, propiedades y naturaleza de las formaciones.

Es importante capacitar al personal involucrado en la selección y aplicación de fluidos de perforación.

Para que los fluidos realicen sus funciones y propiedades es necesario la calidad de los materiales y aditivos para que las impartan, lo que reducirá problemas operacionales

Es necesario conocer materiales y aditivos para elaborar fluidos de perforación de acuerdo a las necesidades operacionales.

La integración de materiales y aditivos requiere de sistemas de agitación mecánica para su elaboración

Es requisito indispensable aplicar pruebas de laboratorio para evaluar las propiedades de los fluidos para evitar problemas operacionales de alto riesgo como son las pérdidas de circulación atrapamientos de tubería embolamientos de barrena, cementaciones defectuosas y en caso extremo la pérdida del pozo.

Es importante conocer los requisitos de seguridad industrial para el manejo de materiales y aditivos empleados en la elaboración de fluidos de perforación para la protección del personal que los elabora y opera.

Conocer las medidas de seguridad para el manejo de los fluidos para evitar la contaminación al ambiente.

---

---

# BIBLIOGRAFIA.

---

---

## BIBLIOGRAFIA

1. Hidráulica de la perforación rotatoria, IMP
2. Procedimientos para la determinación de la hidráulica de perforación, IMP
3. Burgoyne, A.T. y asociados: Applied drilling Engineering, Society of Petroleum Engineers, textbooks series, second printing, Texas 1991.
4. Lapeyrouse, N.J.: Formulas and Calculations for Drilling, Production and Workover, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1992.
5. Hidráulica avanzada para construir pozos eficientes y seguros, Cía. Halliburton, Baroid, presentación técnica, Villahermosa, 2003.
6. Moore, P.L. Drilling practice Manual Pennwell books Tulsa, Oklahoma.
7. Hidráulica Aplicada Nivel 4, Gerencia de Reparación y Terminación de Pozos, programa nacional de capacitación técnico-práctica PEMEX-IMP, segunda edición, México, 1990.
8. Mitchell, B.: Advanced Oilwell Drilling Engineering Handbook and computer programs, Mitchell Engineering, 9th Edition, Colorado, USA, July 1993.
9. Factors Influencing Hole Cleaning Particle Transport in Drilling Environments, Drilling fluids proposal, material prepared by IFE team Petrobras Bolivia S.A., 1998.
10. Recortes 1.0, Predicción de la Limpieza de un Pozo, guía de usuario, Subdirección de Transformación Industrial, IMP, México, agosto 1999.