



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**“TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS  
HORIZONTALES”**

**T E S I S P R O F E S I O N A L  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO PETROLERO  
P R E S E N T A :**

**ZAPATERO FLORES PEDRO**



**DIRECTOR: M. en C. JAIME ORTIZ RAMÍREZ**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**2007**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

## INDICE

<b>CAPITULO 1.- INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO 2.- VISION GENERAL DE LA PERFORACION HORIZONTAL .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 ANTECEDENTES HISTORICOS DE LA PERFORACION HORIZONTAL ....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.1 A NIVEL MUNDIAL .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.2 EN MEXICO .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.3 LOS PRIMEROS POZOS HORIZONTALES EN MEXICO.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 DEFINICION DE POZO HORIZONTAL.....</b>	<b>12</b>
<b>2.3 LIMITACIONES DE LOS POZOS HORIZONTALES.....</b>	<b>12</b>
<b>2.4 APLICACIONES DE LOS POZOS HORIZONTALES .....</b>	<b>13</b>
<b>2.5 TECNICAS DE PERFORACION .....</b>	<b>14</b>
<b>2.5.1 POZOS DE RADIO LARGO.....</b>	<b>15</b>
<b>2.5.2 POZOS DE RADIO MEDIO .....</b>	<b>15</b>
<b>2.5.3 POZOS DE RADIO CORTO.....</b>	<b>15</b>
<b>2.5.4 POZOS DE RADIO ULTRACORTO.....</b>	<b>16</b>
<b>2.6 TECNICAS DE TERMINACION.....</b>	<b>16</b>
<b>2.7 CONSIDERACIONES DE TERMINACION.....</b>	<b>17</b>
<b>2.8 CURVA PARA LLEGAR DE LA VERTICAL A LA HORIZONTAL .....</b>	<b>19</b>
<b>2.8.1 CURVA UNIFORME .....</b>	<b>19</b>
<b>2.8.2 CURVA UNIFORME CON TANGENTE.....</b>	<b>19</b>
<b>2.9 SELECCION DE LA TRAYECTORIA DEL POZO HORIZONTAL .....</b>	<b>20</b>

# TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

<b>CAPITULO 3.- ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS FACTORES QUE AFECTAN EL TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES....</b>	<b>23</b>
<b>3.1 GASTO.....</b>	<b>24</b>
<b>3.2 VELOCIDAD DE PENETRACION.....</b>	<b>25</b>
<b>3.3 VISCOSIDAD EFECTIVA DEL FLUIDO.....</b>	<b>25</b>
<b>3.4 EXCENTRICIDAD DE LA TUBERIA .....</b>	<b>25</b>
<b>3.5 EFECTO DE LA DENSIDAD DEL FLUIDO Y DE LOS RECORTES .....</b>	<b>26</b>
<b>3.5.1 DENSIDAD DEL FLUIDO.....</b>	<b>26</b>
<b>3.5.2 DENSIDAD DE LOS RECORTES.....</b>	<b>26</b>
<b>3.6 EFECTO DEL TAMAÑO DE LOS RECORTES Y EL ANGULO DE INCLINACION.....</b>	<b>27</b>
<b>3.6.1 TAMAÑO DE LOS RECORTES.....</b>	<b>27</b>
<b>3.6.2 INCLINACION DEL POZO.....</b>	<b>27</b>
<b>3.7 ROTACION DE LA TUBERIA DE PEFORACION .....</b>	<b>28</b>
<b>3.8 INDICE DE COMPORTAMIENTO DEL FLUIDO (“n”).....</b>	<b>28</b>
<b>CAPITULO 4.- VELOCIDAD CRÍTICA EN EL TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES.....</b>	<b>37</b>
<b>4.1 COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD CRÍTICA.....</b>	<b>39</b>
<b>4.1.1 DEFINICIÓN DE LA <math>V_{crit}</math> POR RODAMIENTO DE LOS RECORTES.....</b>	<b>40</b>
<b>4.1.2 DEFINICIÓN DE LA <math>V_{crit}</math> PARA LA SUSPENSION DE LOS RECORTES..</b>	<b>40</b>
<b>4.1.3 <math>V_{crit}</math> PARA INICIAR EL RODAMIENTO DE LOS RECORTES.....</b>	<b>40</b>
<b>4.1.4 <math>V_{crit}</math> PARA INICIAR LA SUSPENSION DE LOS RECORTES.....</b>	<b>40</b>

## **TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES**

<b>4.2</b>	<b>DESARROLLO DE LA ECUACION PARA PREDECIR LA VELOCIDAD CRÍTICA.....</b>	<b>44</b>
<b>4.3</b>	<b>EJEMPLO.....</b>	<b>47</b>
<b>CAPITULO 5.- OPTIMIZACION DE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO DE PERFORACION PARA UNA LIMPIEZA EFECTIVA DEL AGUJERO EN POZOS HORIZONTALES.....</b>		
<b>5.1</b>	<b>EL MODELO REOLOGICO DE LA LEY DE POTENCIAS CON PUNTO DE CEDENCIA (Herschel-Bulckey).....</b>	<b>54</b>
<b>5.2</b>	<b>EFFECTO DE LAS PROPIEDADES REOLOGICAS DEL FLUIDO DE PERFORACION Y DEL GASTO EN LA LIMPIEZA DEL AGUJERO.....</b>	<b>55</b>
<b>5.3</b>	<b>OPTIMIZACION DE LAS PROPIEDADES REOLOGICAS DEL FLUIDO DE PERFORACION Y DEL GASTO PARA UN TIEMPO MINIMO DE CIRCULACION.....</b>	<b>57</b>
<b>CAPITULO 6 .- CONCLUSIONES.....</b>		
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>67</b>

**CAPITULO 1**

**INTRODUCCION**

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

Un pozo horizontal es aquel donde la última etapa del pozo que se perfora es horizontal o paralela al yacimiento. Mientras que los pozos verticales se perforan perpendiculares a los planos de estratificación<sup>1</sup>. La mayoría de los pozos horizontales, han sido enfocados al mejoramiento de la producción a partir de yacimientos naturalmente fracturados y a la reducción de la conificación de agua y gas. La decisión de desarrollar un yacimiento con pozos horizontales o con pozos verticales, es una decisión que debe tomarse de acuerdo a las características del yacimiento<sup>5</sup>.

El principal objetivo de la perforación horizontal es mejorar la capacidad de producción de los pozos e incrementar la eficiencia de recuperación final de los yacimientos<sup>3</sup>.

Los pozos horizontales pueden ser utilizados para incrementar los ritmos de producción en campos existentes, debido a que aumenta el área de drene y su eficiencia por gravedad. La perforación horizontal permite desarrollar campos costa fuera con pocos pozos y por ende con plataformas más pequeñas y económicas que las convencionales<sup>5</sup>.

El proyecto de un pozo horizontal es diferente de uno vertical, debido a que la productividad del pozo depende de la longitud perforada y esta depende de la tecnología de perforación. Los pozos horizontales han probado su capacidad para incrementar la producción por lo que la experiencia adquirida durante la planeación, perforación y terminación ha hecho que los costos se reduzcan considerablemente. Cuando se diseña un pozo horizontal, lo que se busca es perforar un pozo productor con un agujero que pueda ser terminado tal como se planeo, produciendo el menor daño posible a la formación y que este libre de recortes.

El éxito en la perforación y producción de pozos horizontales depende en gran medida de los fluidos utilizados durante la perforación y terminación. Los requerimientos usuales para los fluidos de control y su equipo de control para pozos verticales no varían mucho con respecto a los que se emplean en un pozo horizontal, solo que hay unos requerimientos que adquieren mayor importancia en los pozos horizontales. Las funciones más importantes que realizan estos fluido son:

- (1) Controlar las presiones de la formación
- (2) Operar los sistemas de motores de fondo y MWD
- (3) Enfría y lubrica la barrena y la sarta de perforación
- (4) Mantiene en suspensión los recortes, cuando se suspende la circulación del fluido.
- (5) Limpiar el agujero de los recortes generados por la barrena

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

La limpieza del agujero es más difícil en agujeros desviados, por lo tanto esta última función toma especial importancia para los pozos con grandes ángulos y horizontales. La limpieza del agujero es lo más importante en las operaciones para pozos altamente desviados y horizontales, en donde los recortes deben ser transportados a través de varias secciones inclinadas que van desde  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .

Una gran cantidad de pruebas y estudios se han realizado en pozos direccionales cuyos ángulos varían de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  y con diferentes fluidos de perforación, así como regímenes de flujo para obtener los datos que faciliten el óptimo diseño de los pozos, ya que la perforación de pozos direccionales trae consigo muchos problemas que generalmente no se presentan en pozos verticales<sup>18</sup>.

La limpieza del agujero en la perforación direccional y horizontal es un problema común y costoso. Puede llegar a ser particularmente crítico en el caso de la perforación de alcance extendido donde son perforados pozos más largos y de mayor duración. En años recientes, muchos estudios de laboratorio así como observaciones de campo han sido enfocados a los problemas generados en el transporte de recortes. Algunas investigaciones en el transporte de recortes enfatizan la importancia de la velocidad del fluido, mientras en otras, hacen hincapié en las propiedades reológicas del fluido de perforación. Esto ha dado como resultado en un mejor entendimiento del tema y algunas soluciones a los problemas.

Una inadecuada limpieza del agujero en la perforación de pozos horizontales puede causar un gran número de problemas, como son desgaste prematuro de la barrena, una baja velocidad de perforación, fracturar la formación, un elevado torque y arrastre, y que se pegue la tubería. Si la situación no es manejada de forma adecuada, el problema puede tener como resultado la pérdida del pozo. Varios estudios de campo han documentado que la limpieza del agujero es un problema que ocurre frecuentemente, el cual tiene que ser observado cuidadosamente, ya que puede desarrollar serios problemas, como los ya mencionados<sup>17</sup>.

Las predicciones en el transporte de recortes son esenciales para la planeación en la perforación direccional y horizontal. Los problemas por pegadura de la tubería son una de las principales causas de pérdida de tiempo durante las operaciones de perforación y el costo a nivel mundial es de cientos de millones de dólares.

Investigaciones realizadas por diferentes empresas revelaron que en promedio el 60% del tiempo perdido se debía a eventos imprevistos, además mostraron que los problemas por pegadura de la tubería fueron la principal causa de pérdidas de tiempo.

Las posibles causas de las pegaduras de tubería son varias e incluyen problemas relacionados a la formación (fracturadas, no consolidadas, geopresionadas, entre



## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

otras), problemas mecánicos (debido a la geometría del pozo, una ineficiente limpieza del agujero, casing colapsada, etc.). Una tercera parte de todos los problemas por pegaduras de tubería se debe al transporte ineficiente de los recortes<sup>20</sup>.

Si los recortes no pueden ser removidos del agujero, la perforación no puede seguir por mucho tiempo. El transporte no es usualmente un problema si el pozo es casi vertical. Sin embargo, pueden ocurrir considerables dificultades cuando el pozo esta siendo perforado direccionalmente. La severidad de los problemas de perforación ocasionada por una deficiente limpieza, depende de la cantidad y la localización de los recortes distribuidos a lo largo del agujero<sup>21</sup>.

Es muy importante no pasar por inadvertido el daño a la formación en la zona productora que se ocasiona por los fluidos de perforación que pasan mucho tiempo en contacto con el yacimiento, mientras se perfora la sección horizontal y porque muchos de estos pozos no siempre son cementados o entubados. Por lo tanto, es indispensable usar fluidos con baja perdida de filtrado y de bajo contenido de sólidos, así mismo, debe de asegurarse que el enjarre se pueda remover efectivamente durante la fase de terminación.

T. I. Larsen y J.J Azar son dos de los más reconocidos investigadores sobre el transporte de recortes en pozos de gran inclinación y horizontales. Han dirigido estudios muy extensos en los Proyectos de Investigación de Perforación en la Universidad de Tulsa, desde hace tres décadas con el apoyo de las principales compañías petroleras del mundo. La **figura 1.1** muestra un esquema de las instalaciones donde se realizaron las pruebas. Este consistía de una sección anular transparente de 40 ft de longitud con 5 in de diámetro interior y los medios para variar y controlar, (1) el ángulo de inclinación entre la vertical y la horizontal, (2) el gasto de bombeo del lodo, (3) la velocidad perforación y (4) la rotación y excentricidad<sup>17</sup>. T. I. Larsen, A.A. Pilehvari, y J.J. Azar, desarrollaron un modelo para pozos de gran inclinación y horizontales (55° a 90°), el cual predice la velocidad critica y el espesor de la cama de recortes. La **figura 1.2** ilustra el proceso de transporte de recortes en agujeros verticales y horizontales.

El objetivo de este trabajo esta enfocado al entendimiento de bs principales factores que afectan el comportamiento de los recortes perforados en los pozos de gran inclinación y horizontales. Además de presentar el desarrollo de un modelo para el transporte efectivo de los recortes. Este modelo provee una herramienta útil al ingeniero de perforación, para la planeación de la limpieza del agujero en pozos de gran desviación y horizontales.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

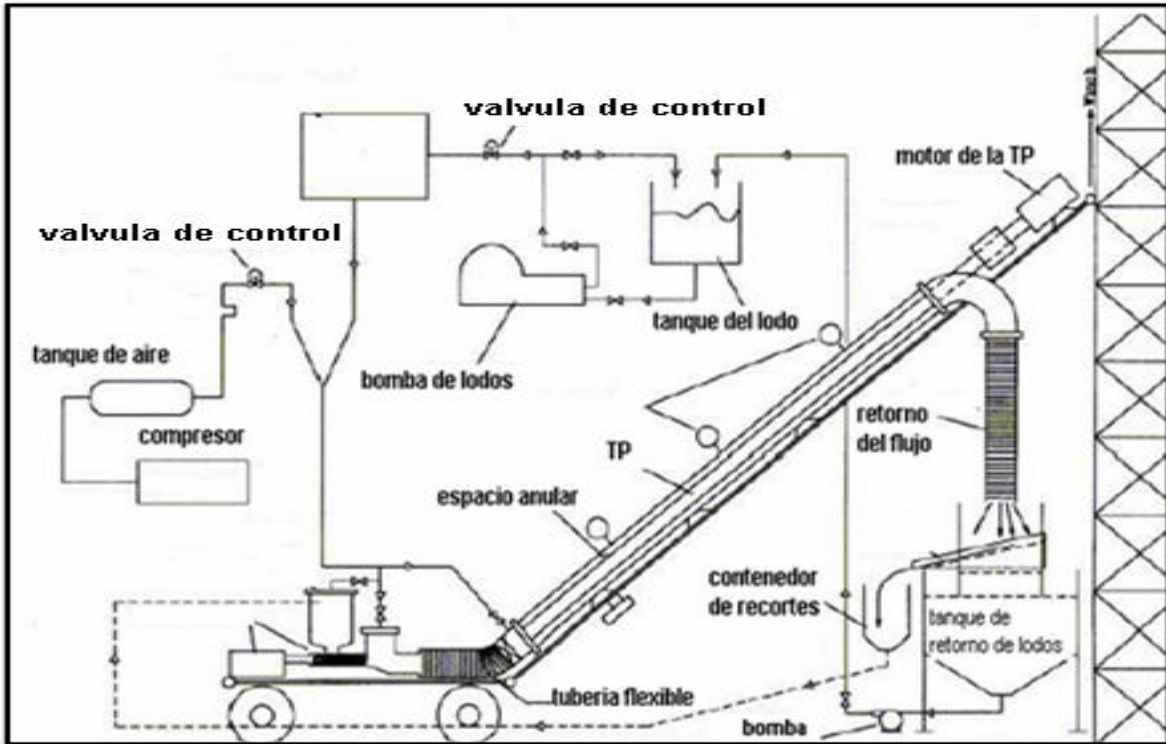


Figura 1.1- Esquema de las instalaciones de prueba<sup>14</sup>

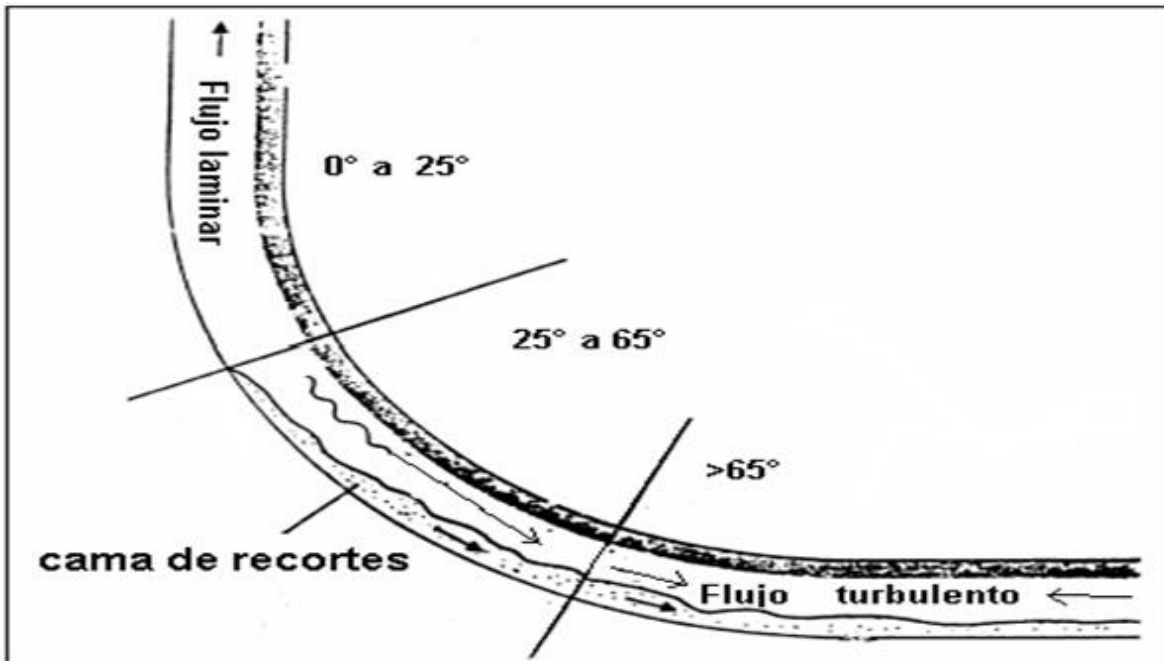


Figura 1.2- Transporte de recortes en pozos inclinados y horizontales<sup>23</sup>.

**CAPITULO 2**

**VISION GENERAL DE LA PERFORACION  
HORIZONTAL**

## **TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES**

En los últimos años, varios pozos horizontales han sido perforados alrededor del mundo. El principal objetivo de un pozo horizontal es el de incrementar el área de contacto con el yacimiento y así incrementar la productividad del pozo<sup>1</sup>.

En general un pozo horizontal es perforado paralelo al plano del yacimiento. Un pozo vertical es perforado perpendicular al plano del yacimiento (**Figura 2.1**). Si el plano del yacimiento es vertical entonces un pozo vertical puede ser perforado paralelo al plano del yacimiento y teóricamente será un pozo horizontal (**Figura 2.2**). El proyecto de un pozo horizontal es diferente del proyecto de un pozo vertical por que la productividad de un pozo depende de la longitud del pozo. Además la longitud del pozo depende de la técnica de perforación empleada para perforar el pozo. Por lo tanto es esencial que los ingenieros de yacimientos y de perforación trabajen juntos para seleccionar la técnica apropiada de perforación, la cual dará la longitud deseada del pozo horizontal<sup>1</sup>.

La otra consideración importante es el esquema de terminación del pozo, el cual puede ser: en agujero descubierto, insertar un slotted liner, insertar un liner con empacadores externos de TR, o revestir el agujero y disparar la TR, dependiendo de las necesidades de terminación y la experiencia. El tipo de terminación afecta el funcionamiento del pozo horizontal y algunos tipos de terminación son posibles solo con determinadas técnicas de perforación. Así, de esta manera, la longitud del pozo, la localización del pozo en el yacimiento y el tipo de terminación que se establezca, depende del método de perforación. Es muy importante para los ingenieros de yacimientos entender las diferentes técnicas de perforación, sus ventajas y desventajas. Similarmente, los ingenieros en perforación, de producción y geólogos deben de entender los diferentes factores que intervienen en el funcionamiento de los pozos horizontales. Por lo tanto, la cooperación y el equipo de trabajo de diferentes profesionales es esencial para garantizar el éxito del proyecto de un pozo horizontal. El proyecto de un pozo horizontal requiere de un entendimiento multidisciplinario para un éxito económico<sup>1</sup>.

### **2.1 ANTECEDENTES HISTORICOS DE LA PERFORACION HORIZONTAL**

#### **2.1.1 A NIVEL MUNDIAL**

Los primeros trabajos importantes sobre perforación horizontal fueron realizados por Eastman, Rany y Sublin entre los años 30's y los 50's, periodo en el que fueron perforados numerosos pozos horizontales. La perforación horizontal empezó como una solución a problemas específicos en el desarrollo de la recuperación mejorada por inyección de vapor, aplicada a yacimientos someros de aceite pesado. No obstante su uso desde los años 30's, fue hasta la década de los 80's, cuando los significativos avances en la tecnología de perforación direccional, hicieron posible un auge en la aplicación de pozos horizontales y empieza a figurar dentro del contexto mundial<sup>3</sup>.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

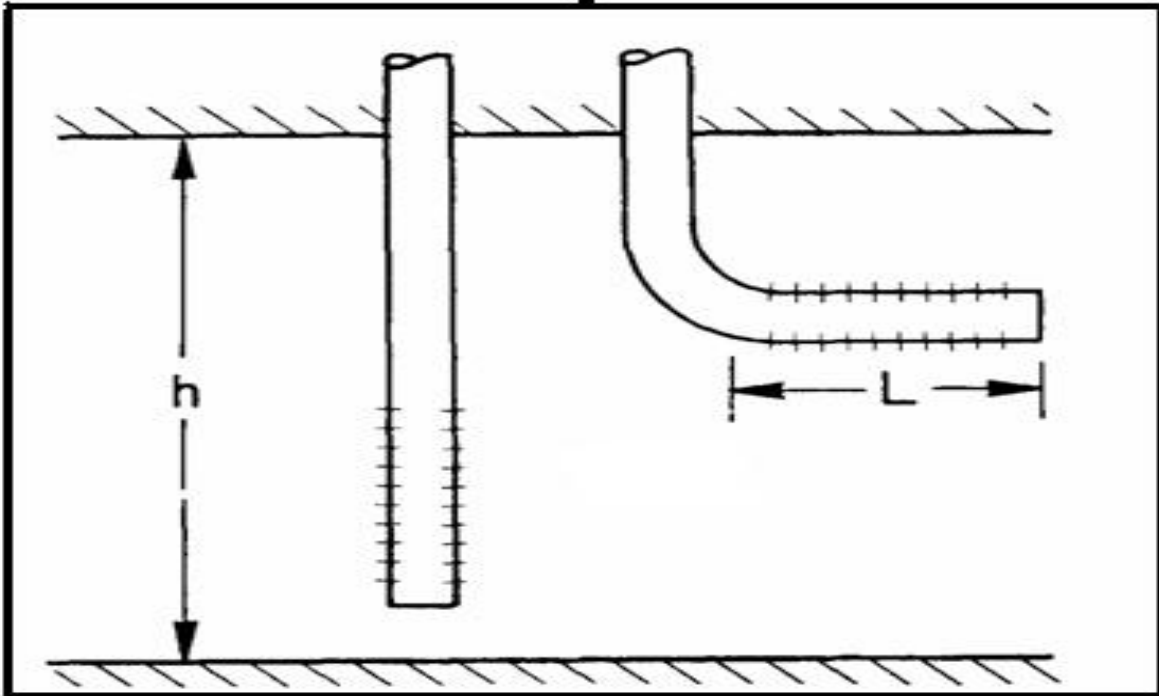


Figura 2.1- Pozo vertical perforado perpendicularmente al plano del yacimiento y un pozo horizontal perforado paralelo al plano del yacimiento<sup>1</sup>.

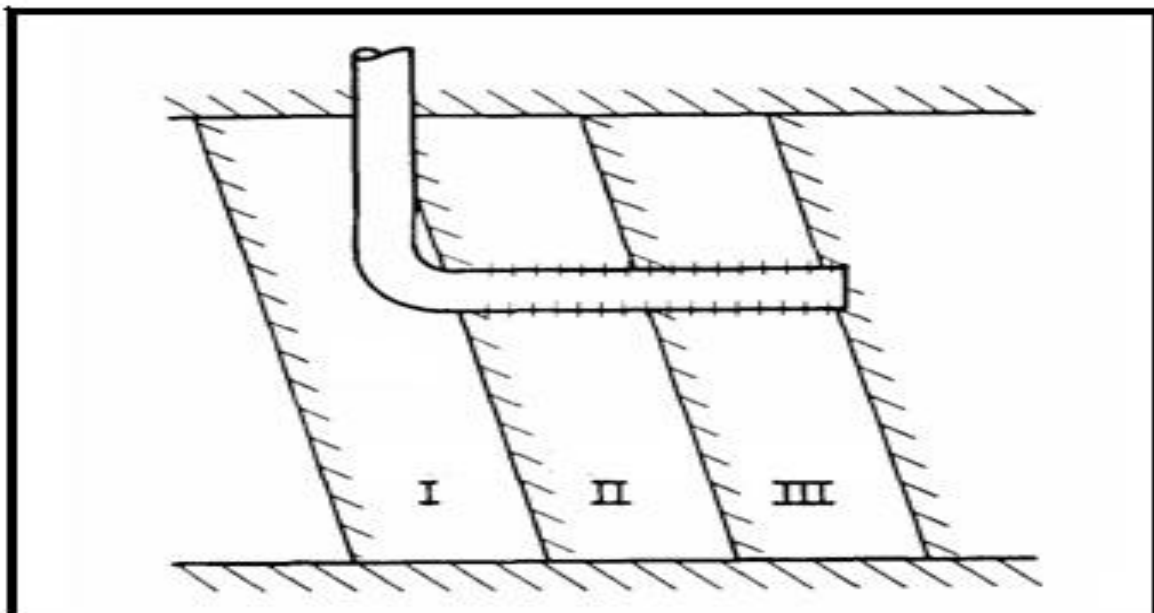


Figura 2.2- Pozo horizontal en un yacimiento con estratos verticales<sup>1</sup>.

## **TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES**

El antecedente más antiguo que se tiene registrado sobre la perforación horizontal se da en la Unión Soviética, en donde se perforaron 43 pozos horizontales cuyo objetivo era el dominio de esta tecnología, por los resultados obtenidos, se llegó a la conclusión de que la perforación horizontal era técnicamente factible, más no económicamente rentable, por lo que el uso de esta técnica fue abandonada por muchos años<sup>6</sup>.

En la década de los 60's, en China se perforaron dos pozos horizontales; el primero de ellos penetra la formación productora con una longitud de 500 m de sección horizontal; desafortunadamente se colapso después de una semana de estar produciendo. A mediados de la década de los 80's, la sociedad Holandesa Unocal Netherlands, planeo la perforación de varios pozos horizontales de radio medio a partir de pozos verticales ya existentes e invadidos de agua, localizados en yacimientos de arenas deleznable. En este caso la aplicación de la técnica de perforación horizontal fue exitosa. En 1985 la compañía de gas y aceite ARCO perforo aproximadamente 20 pozos en Indonesia con el fin de resolver los problemas de conificación en un yacimiento calcáreo. En 1986, el departamento de energía de los Estados Unidos perforo un pozo horizontal usando aire como fluido de perforación. Dicho pozo penetra un yacimiento de gas<sup>6</sup>.

En 1986 solamente se perforaron del orden de 50 pozos horizontales en el mundo. En 1989 se perforaron del orden de 300 pozos, ascendiendo a más de 1200 para 1990. Estas cifras muestran la dramática expansión que ha tenido la perforación horizontal en los últimos años, continuando su actividad a razón de un 20% anual hasta 1995. El desarrollo de la formación Austin Chalk, en el sur de Texas, representó en 1990 el 60% de la actividad mundial y el 75% de la actividad doméstica de Estados Unidos<sup>3</sup>.

### **2.1.2 EN MEXICO**

La mayor parte de la actividad de la perforación horizontal, a la fecha, ha sido enfocada al mejoramiento de la producción a partir de yacimientos naturalmente fracturados y sobre la reducción de la conificación de agua y de gas<sup>3</sup>.

Los yacimientos naturalmente fracturados representan excelentes objetivos para los pozos horizontales. Esto en la industria petrolera es bien conocido ya que a la fecha más del 70% de los pozos horizontales en el mundo se han hecho en este tipo de yacimientos. Los yacimientos petroleros más importantes de México se encuentran en el sureste de México donde predominan las formaciones naturalmente fracturadas.

Las altas producciones en muchos de estos campos están relacionadas con porosidad secundaria por cavernas de disolución y por fracturas de tal forma que es necesario determinar la orientación del sistema de fracturas para una correcta explotación del yacimiento, con lo que se incrementara la producción y se mejorara la recuperación de los mismos<sup>2</sup>.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

El uso de la perforación horizontal se ha incrementado notablemente debido a las ventajas que representa (un radio de drene extendido, aumento en los gastos de producción y un incremento en la recuperación final del campo.). México no puede quedar rezagado en esta tecnología, por lo que se han perforado con éxito algunos pozos horizontales (Agua Fría, Cuitlahuac, Franco española, Poza Rica, Cerro Azul, Akal, Abkatún, Zapp, Catedral y Cerro Nanchital), logrando con ello mejor dominio de la tecnología tanto de perforación como de terminación.

Los costos de extracción del petróleo son cada día más altos y el riesgo durante la perforación de pozos profundos es grande, por lo que los pozos horizontales son una fuerte opción a futuro para obtener más hidrocarburos<sup>2</sup>.

El costo de un pozo horizontal es aproximadamente de 2 a 4 veces mayor que un pozo vertical por lo que la producción de un pozo horizontal debe ser de 2 a 4 veces mayor que la de un pozo vertical para que sea rentable este efecto se acentúa en yacimientos naturalmente fracturados donde la perforación horizontal mejora la producción en un factor de cinco y hasta veinte veces en esto radica la importancia de la selección de la "mejor" trayectoria para llegar al objetivo, ya que de lo contrario la ganancia será menor y en muchos casos se pueden incluso tener pérdidas económicas severas.

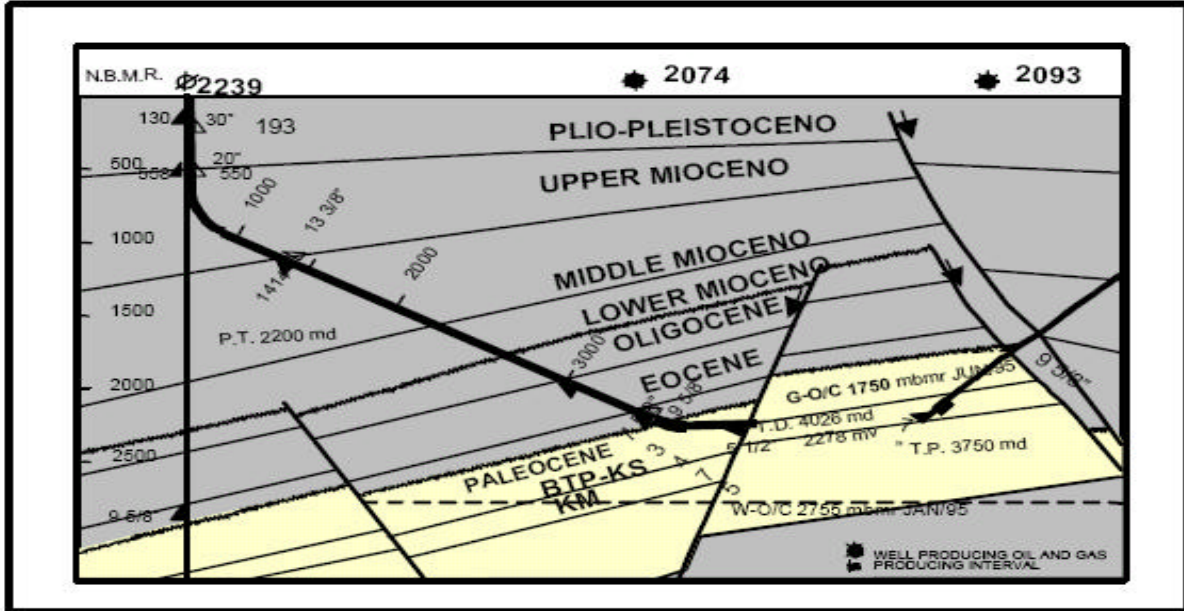
Hasta 1997, en México se habían perforado siete pozos horizontales: cuatro en el campo Agua fría en el año de 1991, uno en el campo Cuitláhuac en 1992 y en el campo Akal, dos terminados en 1995.

### 2.1.3 LOS PRIMEROS POZOS HORIZONTALES EN MEXICO

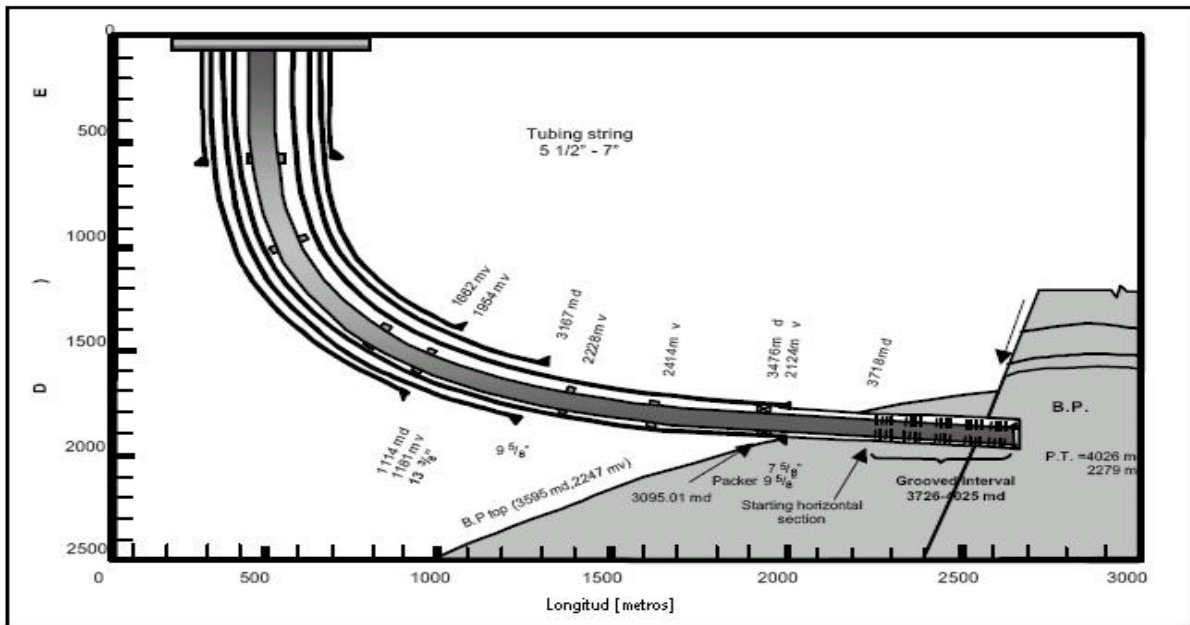
En 1991 se perforo el primer pozo horizontal en México, fue en el campo Agua Fría, del distrito Poza Rica en la Región Norte. Con el objetivo de probar esta tecnología a fin de incrementar los gastos de producción y mejorar la recuperación final de hidrocarburos, además de hacer extensiva su aplicación en otros campos del Paleo canal de Chicontepec. Se perforo una longitud horizontal de alrededor de 1000 m, para tratar de incrementar la productividad y reducir los gastos. Esto también fue motivado porque en la formación de Chicontepec se tiene diferentes cuerpos productores aislados, los cuales serian más fácilmente atravesados por pozos horizontales. En 1995 fue perforado el pozo Cantarell 2074, fue el primer pozo horizontal en la Región Marina. El objetivo principal fue explotar las rocas carbonatadas de la formación brecha del paleoceno (**figuras 2.3 y 2.4**). La perforación del pozo se inicio el 9 de mayo de 1995 y se utilizo la plataforma Akal-R, número de equipo PM - 4048. La compañía perforadora fue P.P.M.P (Pemex Perforación y Mantenimiento de Pozos) y la estructura recuperadora fue el octapodo Akal-R<sup>7</sup>.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

Hasta el 2005 a nivel mundial se habían perforado alrededor de 20,000 pozos horizontales<sup>5</sup>, de los cuales 22 pozos apenas se habían perforado en México en los campos petroleros de Cuitlahuac, Agua Fría, Franco española, Poza Rica, Cerro Azul, Akal, Abkatún, Zapp, Catedral y Cerro Nanchital.



**FIGURA 2.3- Localización del pozo Cantarell 2074, Región Marina Noreste<sup>7</sup>**



**Figura 2.4- Diagrama de terminación del pozo Cantarell 2074, Región Marina Noreste<sup>7</sup>**



## **TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES**

### **2.2 DEFINICION DE POZO HORIZONTAL <sup>5</sup>**

Se define a un pozo horizontal aquel donde la última etapa del pozo que se perfora es horizontal o paralela al yacimiento (pozos de gran desviación). Los pozos horizontales pueden ser utilizados para incrementar los ritmos de producción en campos existentes, debido a que se aumenta el área de drene y su eficiencia por gravedad. La perforación horizontal permite desarrollar campos costa fuera con pocos pozos y por ende con plataformas más pequeñas y económicas que las convencionales.

La perforación horizontal se puede aplicar a yacimientos de baja permeabilidad, yacimientos cuyos fluidos son de alta viscosidad y en yacimientos naturalmente fracturados conectando las fracturas con el pozo permitiendo el flujo de los fluidos del yacimiento.

La decisión de desarrollar un yacimiento con pozos horizontales o con pozos verticales, es una decisión que debe tomarse de acuerdo a las características del yacimiento.

### **2.3 LIMITACIONES DE LOS POZOS HORIZONTALES**

La adecuada selección de la trayectoria del pozo requiere mucho cuidado en su programación, evaluación, perforación y terminación del pozo. Actualmente se pueden perforar pozos con una gran longitud horizontal, suministrando significativamente un área de contacto mayor a la que puede aportar un pozo vertical. Una de sus desventajas es que solamente una zona productora puede ser drenada por el pozo horizontal. En la actualidad los pozos horizontales han sido usados para drenar múltiples estratos.

Entre otras desventajas principales se encuentran las siguientes:

1. Inestabilidad del agujero, la cual puede provocar cierres o fracturas del agujero.
2. Estratos o capas de recortes en la parte baja del pozo debido a la ineficiente limpieza del agujero.
3. Enjarres depositados en formaciones permeables
4. Pegaduras de tuberías de perforación y revestimiento
5. Dificultades al realizar registros y hacer pruebas
6. Trabajos pobres de cementación <sup>2</sup>

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

7. El costo es alrededor de 1.4 a 3 veces más que un pozo vertical, dependiendo del método de perforación y la técnica de terminación empleada. El aumento en el costo de la perforación de pozos horizontales sobre los pozos verticales se ha reducido significativamente en los últimos años<sup>1</sup>.

### 2.4 APLICACIONES DE LOS POZOS HORIZONTALES

Los pozos horizontales han sido usados efectivamente en las siguientes aplicaciones<sup>2</sup>:

1. En yacimientos con baja permeabilidad o bien donde  $K_{vertical} > K_{horizontal}$ <sup>2</sup>
2. En yacimientos heterogéneos.
3. Incrementar los ritmos de producción en campos existentes, en donde los pozos verticales son de bajo índice de productividad.
4. Desarrollar campos costa-afuera con pocos pozos y por ende con plataformas más pequeñas y económicas que las convencionales.
5. Esta técnica es aplicable tanto a formaciones de arenisca como en las de caliza.
6. En yacimientos con empuje hidráulico o por expansión del casquete de gas, en la que los pozos horizontales dan un drene más eficiente por gravedad y un área de drene más extensa.
7. En yacimientos de poco espesor en los que se requiere un gran número de pozos verticales para explotarlo. Si hay un acuífero asociado con un casquete de gas la situación es aun más favorable.
8. En yacimientos estratificados
9. En proyectos de recuperación secundaria o terciaria, ya que se puede incrementar el índice de inyección y mejorar el barrido, sobre todo en yacimientos de baja permeabilidad y muy compactos.
10. En formaciones estrechas donde es posible hacer fracturas múltiples (4 o más por pozo).
11. En yacimientos naturalmente fracturados, los pozos horizontales han sido usados para atravesar fracturas y drenar el yacimiento efectivamente.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

12. En yacimientos con problemas de conificación de agua y gas, los pozos horizontales han sido usados para minimizar estos problemas, e incrementar la producción de aceite.
13. En producción de gas, los pozos horizontales pueden ser usados en yacimientos con baja permeabilidad, estos pueden incrementar el área de drenaje por pozo y reducir el número de pozos que son requeridos para drenar el yacimiento. En yacimientos de alta permeabilidad, en pozos verticales las velocidades del gas son altas en la vecindad del pozo, los pozos horizontales se pueden utilizar para reducir las velocidades cerca del pozo. Así, de esta manera, los pozos horizontales pueden ser usados para reducir la turbulencia en la vecindad del pozo y mejorar la producción de los pozos en yacimientos de alta permeabilidades<sup>1</sup>.

En pozos mar adentro, en lugares remotos, y áreas de medio ambiente sensible, donde el costo del proyecto puede ser reducido al minimizar el número de pozos que son requeridos para drenar el yacimiento, pero se puede incrementar el volumen del yacimiento y puede ser drenado de una sola plataforma, y reducir significativamente los costos de los proyectos mar adentro<sup>1</sup>.

Similarmente, en áreas naturales sensibles y en yacimientos bajo las ciudades, los pozos horizontales pueden ser empleados para explotar el yacimiento con un mínimo de disturbios en la superficie.

### 2.5 TECNICAS DE PERFORACION

Las técnicas de perforación para perforar pozos horizontales son clasificadas dentro de cuatro categorías, dependiendo del radio de curvatura. El radio de curvatura es el radio que se requiere para girar desde la vertical a la dirección horizontal<sup>1</sup>. La perforación horizontal inicia con una sección vertical o un equipo con una cierta orientación (equipo de orientación), continuando la construcción de una curva de  $0^{\circ}$  a  $90^{\circ}$  antes de entrar al intervalo horizontal de interés. Esto último se logra con la aplicación de los siguientes métodos para el tipo de construcción de radio de curvatura (**figura 2.5**).

1. Método del radio de curvatura largo
2. Método del radio de curvatura medio
3. Método del radio de curvatura corto
4. Método del radio de curvatura ultra corto<sup>4</sup>

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

### 2.5.1 POZOS DE RADIO LARGO

El radio de curvatura es de 1000 a 3000 ft; el ángulo de incremento es de 2 a 6° / 100 ft<sup>1</sup>. La curva se construye desde una profundidad determinada por encima del yacimiento, hasta lograr la dirección horizontal y completar la longitud a perforar, y por lo tanto, la terminación del pozo.

Esta técnica es la más común y aplicable en pozos costa afuera. Es conocida como largo alcance o “alcance extendido”. Sin embargo, estos pozos son perforados de 70 a 80° sin alcanzar el objetivo en el plano horizontal. Esta técnica se aplica para minimizar los impactos ambientales y reducir los costos de campo en desarrollo.

### 2.5.2 POZOS DE RADIO MEDIO

El radio de curvatura es de 300 a 800 ft; el ángulo de incremento es de 6 a 20° / 100 ft<sup>1</sup>. Esta técnica es la más usada en pozos terrestres. La curvatura tiene la función de proteger la ubicación del agujero cuando se tienen formaciones con afallamientos y estratos muy pronunciados, con ello se logra que el pozo pueda perforarse y terminarse con herramientas convencionales en el tiempo estimado.

La extensión horizontal máxima posible parece incrementarse día con día con longitudes realizadas de hasta 3200 pies. La aplicación de este sistema, es el trabajo de la tubería de perforación y la T.R, crea resultados y problemas de fricción dentro de los límites aceptables.

La técnica debe ser primordialmente aplicada dentro de los yacimientos de aceite con propiedades especiales tales como fracturas naturales, capas adyacentes de gas y subyacentes de agua que requieren un agujero horizontal dentro de los límites verticales estrechos. La ejecución del radio medio requiere de soportes técnicos y más específicamente de aparejos de fondo flexibles<sup>4</sup>.

### 2.5.3 POZOS DE RADIO CORTO

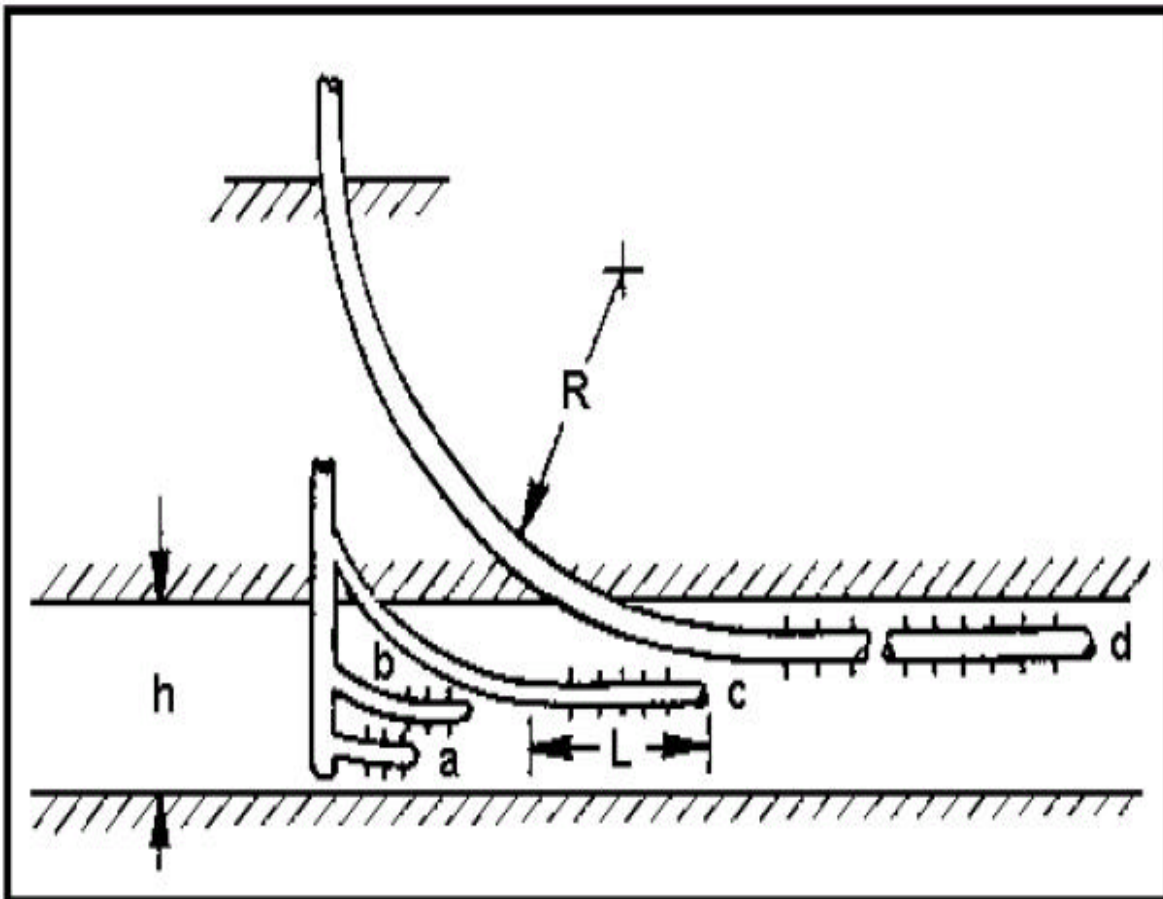
El radio de curvatura es de 20 a 40 ft; el ángulo de incremento es de 2 a 5° / ft<sup>1</sup>. La tecnología de radio corto ha sido aplicada en la perforación de pozos en donde las formaciones tienen problemas geológicos por encima de la dirección del yacimiento, o bien, por razones económicas. De esta manera el agujero se comunica y se extiende dentro del yacimiento. Esta técnica también es conveniente para una sección horizontal en pozos ya existentes con baja productividad y por cambio de objetivo. El drene horizontal múltiple con diámetro arriba de 6” puede perforarse para un pozo vertical. Rigurosamente usan herramientas articuladas en la sarta de perforación. De esta forma se genera la dirección al yacimiento para un pozo sencillo. El agujero horizontal puede ser dirigido mientras se perfora. Puede corregirse el curso si se requiere para

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

mantener la fase horizontal hacia el objetivo. La técnica requiere de herramientas y soportes tecnológicos especializados.

### 2.5.4 POZOS DE RADIO ULTRACORTO

El radio de curvatura es de 2 ft; el ángulo de incremento es de  $45^{\circ}$  a  $60^{\circ}/\text{ft}^1$ . Esta técnica es muy apropiada en la aplicación de inyección de agua en formaciones blandas, no consolidadas y depresionadas. La aplicación más común de la perforación radial dentro del yacimiento se usa para reducir el depresionamiento del yacimiento por segregación gravitacional o para la inyección de vapores u otros fluidos, dentro del yacimiento que tiene recuperación de energía no natural<sup>4</sup>.



<b>Radio ultra corto</b>	<b>R=1-2 ft</b>	<b>L=100 - 200 ft</b>
a) Radio corto	R=20-70 ft	L=100 - 800 ft
b) Radio medio	R=300-800 ft	L=1000 - 4000 ft
c) Radio largo	R >1000 ft	L=1000 - 4000 ft

Figura 2.5- Esquema de las diferentes técnicas de perforación<sup>1</sup>

### 2.6 TECNICAS DE TERMINACION<sup>1</sup>

Los pozos horizontales se pueden terminar en agujero descubierto, con liners ranurados, liner con aislamientos parciales y con liners cementados y disparados.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

La selección del método puede tener una influencia significativa en el desempeño del pozo. Las distintas técnicas de terminación, sus ventajas y desventajas son resumidas más adelante. Adicionalmente, algunos puntos que necesitan ser considerados antes de seleccionar el tipo de terminación.

La **figura 2.6** muestra un diagrama de las distintas opciones de terminación de pozos horizontales, los aspectos de terminación se describen a continuación.

1. **Agujero descubierto:** Este tipo de terminación es barata pero es limitada por el tipo de formación en el que se aplica. Adicionalmente, es difícil para estimular este tipo de terminaciones y para el control de la inyección o producción a lo largo de la extensión del pozo. Los primeros pozos horizontales fueron terminados en agujero descubierto.
2. **Terminación con liners ranurados:** El principal objetivo de introducir un liner ranurado en un pozo horizontal es para prevenir el colapso del pozo. Adicionalmente un liner provee un sendero para insertar varias herramientas en un pozo horizontal. Tres tipos de liner han sido usados:
  - a) Liners disparados
  - b) Liners ranurados
  - c) Liners pre-empacados
3. **Liners con aislamientos parciales:** recientemente empacadores externos de casing han sido instalados en el exterior del liner ranurado para dividir el pozo horizontal, en varias secciones pequeñas. Este método provee límites de las zonas aisladas, la cual puede ser usada para estimular o controlar la producción a lo largo del pozo.
4. **Liners cementados y disparados:** Es posible para cementar y perforar pozos de radio medio y largo.

### 2.7 CONSIDERACIONES DE TERMINACION <sup>1</sup>

Varios puntos necesitan ser considerados antes de seleccionar el esquema de terminación adecuado. A continuación se da una breve discusión de cada punto:

1. **Roca y tipo de formación:** Si se considera una terminación en agujero descubierto, entonces es importante asegurar que la roca es adecuada y la perforación del agujero será estable. Varios de los primeros pozos horizontales perforados en formaciones de caliza fueron terminados en agujero descubierto. Cuando los pozos horizontales son perforados a lo largo de la dirección del mínimo esfuerzo horizontal, el pozo presenta una excelente estabilidad.

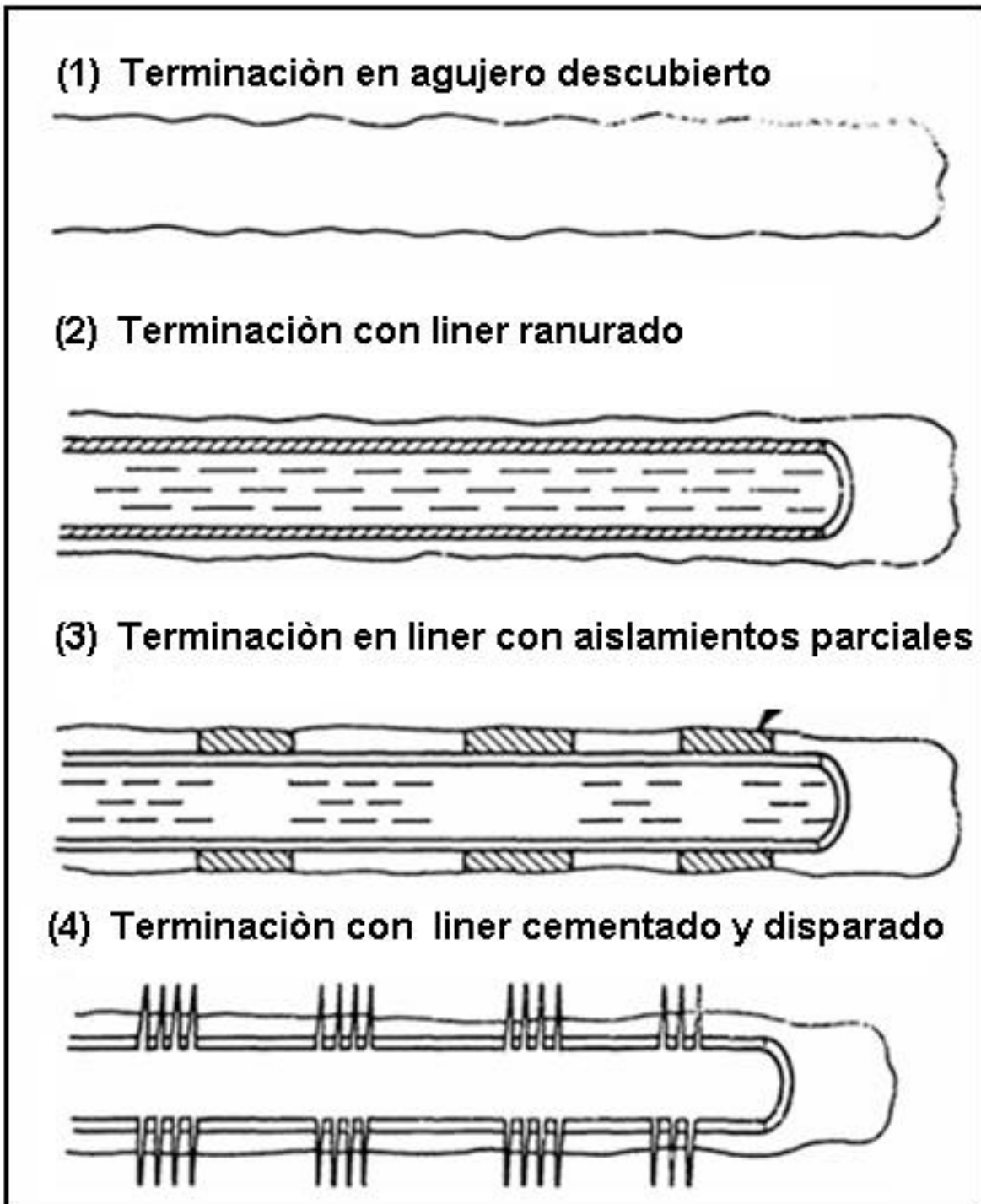


Figura 2.6- Esquema de las distintas técnicas de terminación de pozos horizontales<sup>1</sup>.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

2. Método de perforación: Como se menciona antes, con radios cortos solo es posible la terminación en agujero descubierto y slotted liners. En pozos de radio medio y largo las terminaciones pueden ser en agujero descubierto, agujero descubierto con slotted liners o cementado y disparado.
3. Fluido de perforación: El daño a la formación durante la perforación horizontal es un problema serio en muchos pozos, especialmente para pozos perforados en yacimientos de baja permeabilidad.
4. Los pozos horizontales llevan un tiempo significativamente mayor para su perforación que un pozo vertical, por lo tanto la formación productora es expuesta al fluido de perforación por un mayor periodo de tiempo que en un pozo vertical.
5. Requerimientos de estimulación: Un pozo horizontal cementado, es el adecuado si el pozo va a ser fracturado. El pozo puede ser aislado en varias zonas a lo largo de su extensión y cada zona puede ser fracturada en forma independiente.
6. Requerimientos de los mecanismos de producción: En algunos pozos, especialmente los perforados en yacimientos fracturados, con un acuífero asociado, el agua puede fracturar cierta porción del pozo horizontal. En yacimientos con capas de gas, es importante para obtener un aislamiento efectivo de la capa de gas. Se pueden usar empacadores o liners cementados para aislar la tubería de producción de la capa de gas.
7. Requerimientos de abandono: En la actualidad no hay regulaciones especiales para abandonar un pozo horizontal. Sin embargo ingeniero puede anticipar y diseñar la terminación para que el pozo pueda ser abandonado en forma segura.

### 2.8 CURVA PARA LLEGAR DE LA VERTICAL A LA HORIZONTAL <sup>5</sup>

#### 2.8.1 CURVA UNIFORME

La curva inicia la desviación con un determinado rango de incremento de ángulo y se deja que continúe con dicho incremento hasta que la inclinación final se obtiene (**figura 2.7**).

#### 2.8.2 CURVA UNIFORME CON TANGENTE

Después de establecer un ángulo de incremento programado, una sección tangencial (recta) con la longitud adecuada se perfora usualmente con una inclinación de 45 a 60° para finalmente ajustar el ángulo requerido para llegar a la profundidad total establecida (**figura 2.8**).



### 2.9 SELECCION DE LA TRAYECTORIA DEL POZO HORIZONTAL <sup>2</sup>

Las principales características que afectan la selección de la trayectoria de perforación de un pozo son la permeabilidad, el tipo de formación y la presencia de fracturas naturales. Para un yacimiento de alta permeabilidad, la dirección de la sección horizontal podría no tener problemas. En yacimientos compactos es necesario conocer el esfuerzo principal mínimo ya que en los pozos horizontales a diferencia de los pozos verticales, las fracturas pueden inducirse a lo largo, inclinadas o perpendiculares a la sección horizontal.

En el caso de fracturas naturales la orientación de la sección horizontal será muy importante, por lo que se requiere determinar la orientación de las fracturas naturales. Para que el pozo pueda interceptar el mayor número de ellas. Algunas veces el corte y análisis de núcleos en la sección vertical de la zona productora, proporcionarán tal información. Si la permeabilidad vertical es muy baja o no existe se perforaría un pozo horizontal y posteriormente se fracturaría hidráulicamente. También se puede aplicar en formaciones estratificadas con pequeñas capas de lutitas que evitan la comunicación entre los intervalos productores.

Para el caso de cualquier formación que un futuro sea necesario aplicarle un fracturamiento hidráulico, la iniciación de la fractura se pretenderá que sea perpendicular al esfuerzo principal mínimo.

Estudios de mecánica de rocas determinaron que el tipo de fracturas creadas cerca del pozo controlara las presiones de ruptura y de cierre instantánea, además estudios posteriores determinaron que fracturas complejas pueden iniciarse en el agujero, además de cambiar la dirección para orientarse a ángulos perpendiculares al esfuerzo principal mínimo.

Si el pozo se perforó con un ángulo de orientación diferente al esfuerzo principal mínimo, el inicio de las fracturas a partir del pozo puede causar altas presiones de ruptura y de cierre instantáneo. Es por tanto que la dirección del pozo debe ser paralela al esfuerzo principal mínimo (**figura 2.9**).

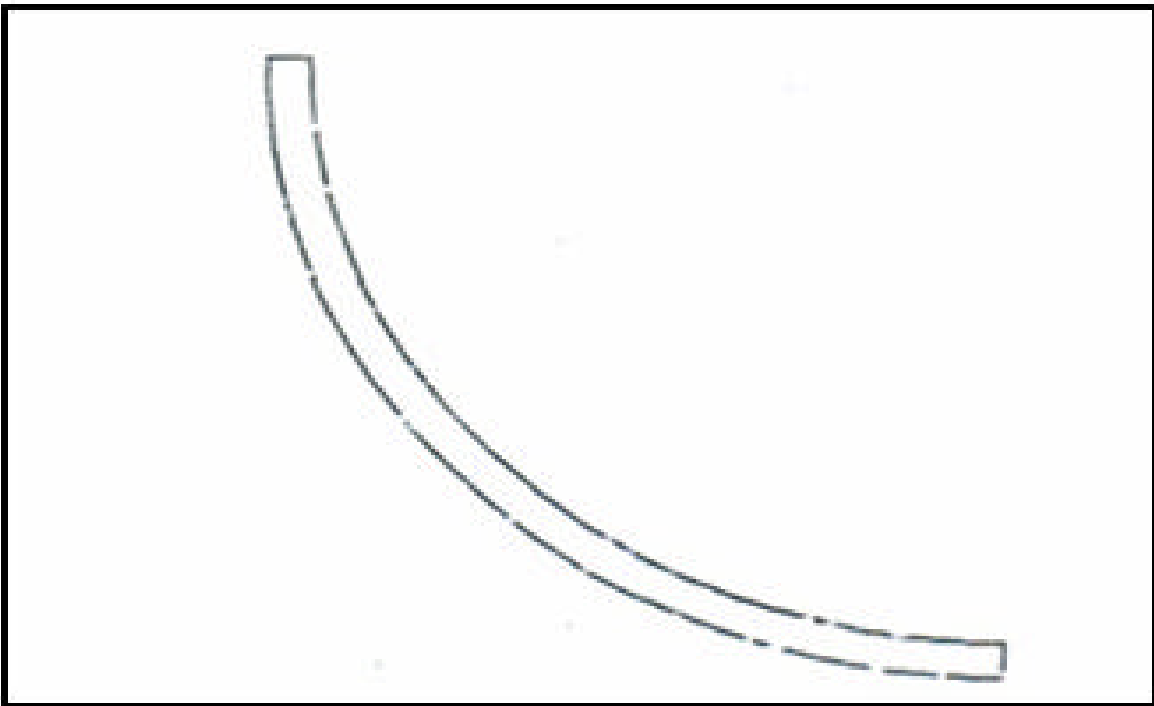
Otros factores que definen la trayectoria de un pozo horizontal en particular aparte de yacimientos naturalmente fracturados son:

1. Obtener altas producciones de hidrocarburos en yacimientos lenticulares.
2. Obtener mejores resultados en proyectos de recuperación secundaria.
3. Reducción de problemas de conificación de agua y gas.
4. Reducción de problemas de producción de arena.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

5. protección ambiental.
6. yacimientos de baja permeabilidad.
7. Reducción del daño a la formación.
8. Yacimientos de gas
9. Estratos inclinados

Se debe tomar la decisión del sistema que mejor se adapte a las condiciones que se tienen. La mayoría dependen del tipo de terminación la cual es función del yacimiento y de las zonas que se requieran aislar a lo largo de la trayectoria, además el costo es otro factor importante en la selección del método de terminación. Por lo que el mejor sistema de perforación horizontal es aquel que permite llegar al objetivo al menor costo total, lo cual generalmente significa llegar al objetivo con un agujero uniforme en el menor tiempo posible.



**FIGURA 2.7- Curva uniforme**

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

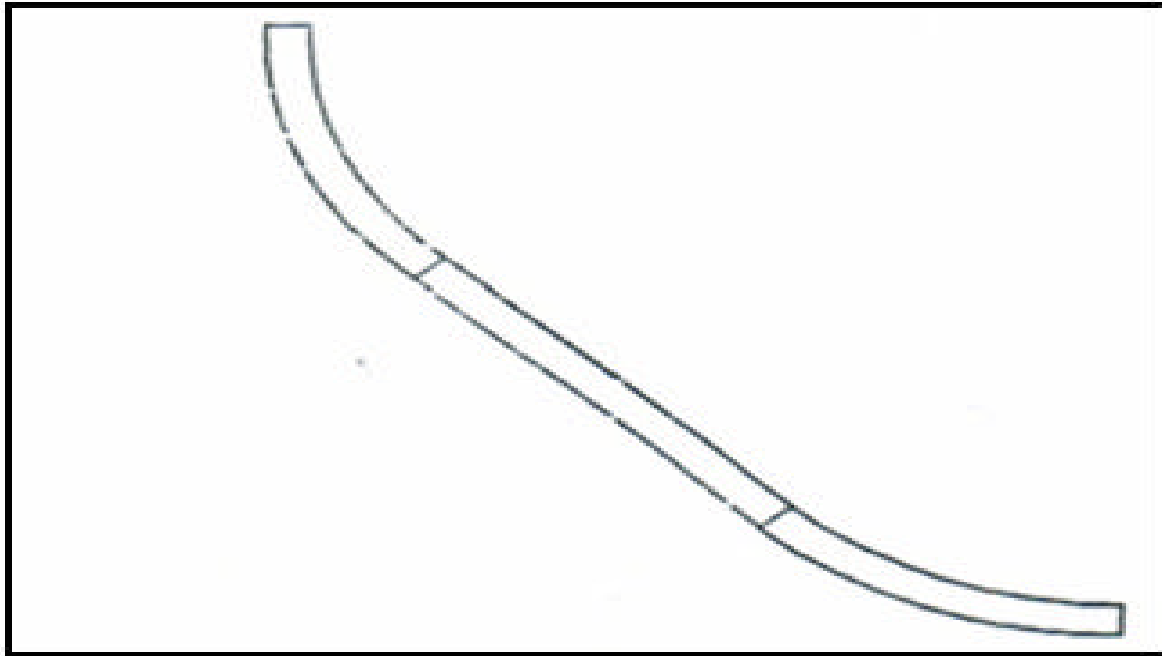


Figura 2.8- Curva uniforme con tangente

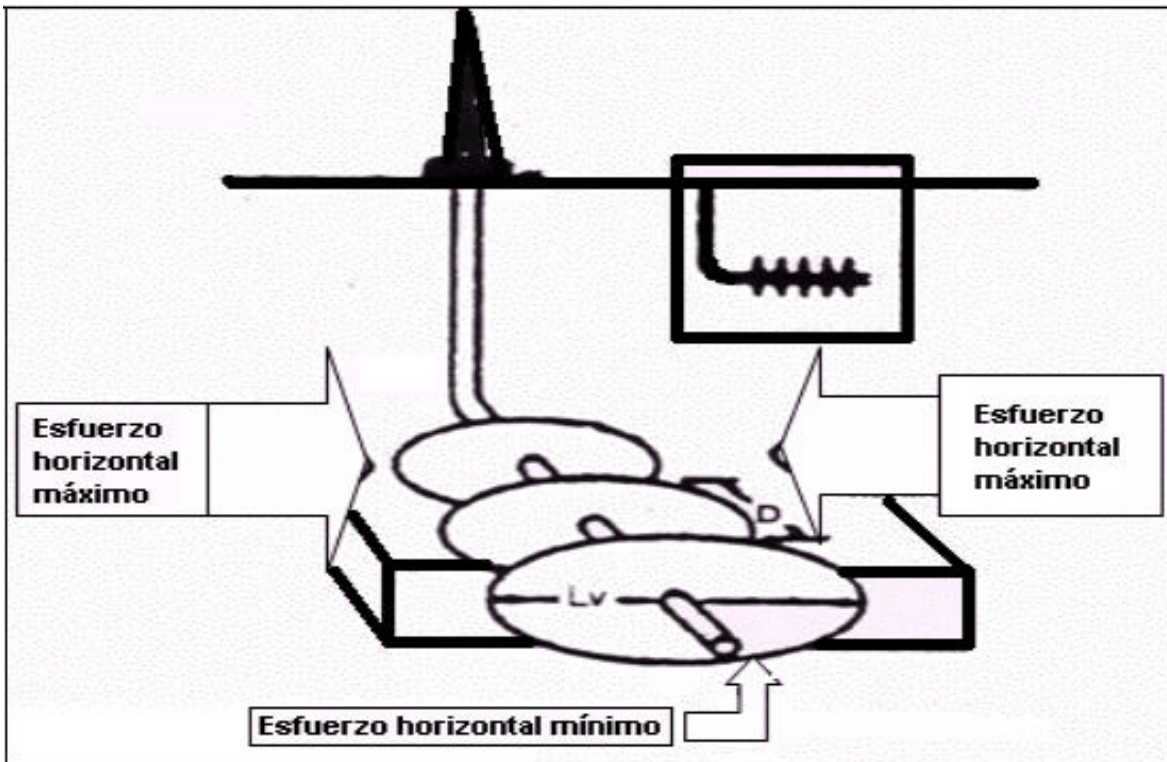


Figura 2.9.- Pozo Horizontal intersectando fracturas múltiples <sup>2</sup>

**CAPITULO 3**

**ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS FACTORES  
QUE AFECTAN EL TRANSPORTE DE RECORTES  
EN POZOS HORIZONTALES**

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

El transporte de recortes tiene un impacto económico en el proceso de la perforación. Los problemas que pueden ser ocasionados por una deficiente limpieza del agujero incluyen pegaduras de tubería, reducción del peso sobre la barrena, desgaste excesivo de la tubería de perforación, costos extras por aditivos especiales en el lodo, entre otros.

El análisis de sensibilidad está enfocado en los factores principales del desarrollo de la cama de recortes durante la perforación de pozos horizontales, tales como gasto, velocidad de penetración, densidad y viscosidad del fluido, tamaño y densidad de los recortes, inclinación y excentricidad del agujero. La **figura 3.1** resume los factores más importantes que influyen en el transporte de los recortes en relación con su facilidad del control en el campo. El uso práctico de estos parámetros para el control en el transporte de recortes depende mucho de su manejo en el campo.

Por ejemplo, la excentricidad de la TP tiene una fuerte influencia en el transporte de recortes. Sin embargo, es muy difícil controlar o evaluar el grado de excentricidad durante las operaciones de perforación.

Como se muestra en la figura 3.1 la reología del fluido de perforación y el gasto son los dos parámetros principales, que pueden influir fuertemente en el transporte de recortes mientras su control en el campo es relativamente fácil. En otras palabras, para asegurar el eficiente transporte de recortes, se utiliza una combinación de las propiedades reológicas del fluido de perforación y el gasto<sup>14</sup>.

### 3.1 GASTO

El parámetro más efectivo de la perforación, en el desarrollo de la cama de recortes es el gasto. Al incrementarse el gasto drásticamente, aumenta la velocidad del fluido, y de esta manera se previene la formación de la cama de recortes y mejora la limpieza de los recortes. Especialmente cuando el flujo es turbulento, los recortes son acarreados más fácilmente, y se reduce significativamente el desarrollo de la cama. Como se puede observar en la **figura 3.2**, se requiere de grandes gastos para prevenir la formación de la cama en el agujero.

La velocidad del fluido juega un papel importante en la limpieza del agujero, esta velocidad también es conocida como velocidad crítica. Sin embargo para los fluidos en flujo laminar, la velocidad del fluido por sí sola no puede remover eficientemente los recortes de pozos desviados. La velocidad del fluido puede perturbar los recortes situados en la cama de recortes y empujarlos hacia la parte central del flujo. Por lo tanto, si el fluido no tiene una adecuada capacidad de acarreo, entonces muchos de los recortes caerán rápidamente en la cama de recortes y este ciclo se repetirá.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

En pozos de gran desviación, la velocidad de circulación es a menudo controlada por las limitaciones de la densidad equivalente de circulación. Una vez que es alcanzado el nivel suficiente o la capacidad máxima de bombeo, entonces la consideración debe ser propensa a ajustar las propiedades del fluido de perforación para mejorar la eficiencia en la limpieza del agujero<sup>10</sup>.

### 3.2 VELOCIDAD DE PENETRACION

La velocidad de penetración tiene un efecto insignificante sobre el grosor de la cama. En la **figura 3.3**, se presenta el efecto de la velocidad de penetración en el desarrollo de la cama. Ha sido observado que a medida que el gasto aumenta, la influencia de la velocidad de penetración sobre el grosor de la cama disminuye.

### 3.3 VISCOSIDAD EFECTIVA DEL FLUIDO<sup>11</sup>

Otro parámetro importante de la perforación en el desarrollo de la cama de recortes es la viscosidad efectiva del fluido. Para pozos verticales, ha sido probado que el incremento en la viscosidad efectiva del fluido mejora el acarreo de los recortes. Sin embargo, para pozos horizontales y de gran inclinación, una alta viscosidad efectiva actúa de manera opuesta.

Puesto que un incremento en la viscosidad efectiva del fluido causa una reducción en el número de Reynolds, lo cual llegara a provocar que sea más difícil obtener las condiciones de flujo turbulento. Por lo tanto, esto incrementara el desarrollo de la cama de recortes dentro del espacio anular. Como se observa en la **figura 3.4**, después de los puntos máximos, al disminuir la viscosidad efectiva del fluido, el grosor de la cama no cambia. Este es el punto sobre la superficie de la cama, donde las fuerzas en la parte superior de la cama de recortes llegan a ser menores que la fuerza de suspensión requerida para levantar los recortes. De la figura 3.4, se puede observar que antes de la máxima relación de áreas, se presenta un incremento en el desarrollo de la cama de recortes, conforme aumenta la viscosidad efectiva del fluido.

### 3.4 EXCENRICIDAD DE LA TUBERIA

La tendencia de la TP es asentarse en la parte baja del agujero debido a la fuerza de gravedad en pozos horizontales y de gran inclinación. Esto causa una desigual distribución de velocidades en el agujero<sup>11</sup>. En un pozo desviado, la línea de perforación usualmente no esta situada en la parte central del agujero. El espacio estrecho del agujero usualmente esta situado en la parte baja del agujero y el espacio amplio esta situado sobre la TP. La excentricidad de la TP es usualmente considerada positiva cuando el espacio más estrecho esta situado debajo de la TP y negativo cuando esta sobre la TP. Para limitar el desarrollo de la cama de recortes es deseable mantener ciertos niveles de la velocidad del fluido donde no puedan acumularse los recortes. La acumulación de recortes es menor y el acarreo es mayor cuando la tubería es concéntrica. El efecto entre ángulos de 0° y

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

35° es muy pequeña, siendo el peor de los casos cuando la excentricidad es negativa, en agujeros concéntricos es mejor, pero no por mucho margen, especialmente con altos gastos. Entre 35° y 55°, no hay efectos consistentes de la excentricidad, y con ángulos mayores a 50° con una excentricidad igual a  $\pm 50\%$  dan el peor funcionamiento especialmente a bajos gastos<sup>18</sup>.

Las velocidades son significativamente bajas en las secciones estrechas, y llegan a ser mayores conforme aumentan los espacios. Por lo tanto, puede ser muy difícil remover una cama de recortes localizada en un agujero excéntrico. En pozos desviados, la cama de recortes se acumula debajo de la TP. Por esta razón se necesita optimizar la velocidad del fluido debajo de la TP para mejorar la limpieza de los pozos desviados<sup>10</sup>.

La **figura 3.5** muestra el efecto de la excentricidad sobre la cama de recortes. A sido observado que el grosor de la cama de recortes se incrementa conforme aumenta la excentricidad. Sin embargo, si el área de la cama de recortes es calculada del espesor de la cama, es observado que el área disminuye en relación con el aumento de la excentricidad. La magnitud de este efecto es reducido con la disminución del gasto<sup>11</sup>.

### 3.5 EFECTO DE LA DENSIDAD DEL FLUIDO Y DE LOS RECORTES

#### 3.5.1 DENSIDAD DEL FLUIDO

La densidad del fluido tiene un efecto moderado en el desarrollo de la cama. Esto se debe al efecto de flotamiento, los recortes pueden ser acarreados con menor fuerza a medida que la densidad del fluido es incrementada. También, si todos los otros parámetros se mantienen constantes, al aumentar la densidad del fluido se presenta un incremento en el número de Reynolds, el cual muestra que las condiciones de flujo turbulento pueden ser más fácilmente obtenidas. El efecto de la densidad del fluido en la formación de la cama de recortes es presentado en la **figura 3.6**.

#### 3.5.2 DENSIDAD DE LOS RECORTES

El efecto de la densidad de los recortes sobre la formación de la cama de recortes puede ser considerado como moderado. Los recortes de mayor densidad, son más difíciles para suspenderlos y transportarlos, debido a los efectos gravitacionales. Además, un incremento en la densidad de los recortes aumentara el desarrollo de la cama de recortes. La **figura 3.7** muestra el efecto de la densidad de los recortes en el desarrollo de la formación de la cama de recortes. Al incrementarse la densidad de los recortes, se observa un aumento en el área de la cama.

El incremento en el peso del lodo tendrá un efecto positivo sobre el transporte de los recortes. Como se muestra en la **figura 3.8**, la velocidad crítica ( $V_{crit}$ ) o

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

velocidad mínima aparentemente disminuye a medida que se incrementa la densidad del lodo. Además, el incremento en la densidad de los recortes parece causar un efecto negativo. Como se puede observar en la grafica, se presenta un cambio en su superficie para el valor de la  $V_{crit}$ , tal vez porque con el incremento de la densidad de la fase liquida, el mecanismo de levantamiento llega a ser dominante en el transporte, en vez del mecanismo de rodamiento<sup>12</sup>.

### 3.6 EFECTO DEL TAMAÑO DE LOS RECORTES Y EL ANGULO DE INCLINACION

#### 3.6.1 TAMAÑO DE LOS RECORTES

El tamaño de los recortes tiene un efecto significativo en el desarrollo de la cama de recortes. Para pozos verticales, ha sido observado que los recortes más pequeños pueden ser acarreados con menor fuerza. En pozos horizontales y de gran ángulo, se ha observado experimentalmente que, al reducir el tamaño de los recortes, puede llegar a ser muy difícil reducir el grosor de la cama de recortes.

Esto es exactamente por la reducción del área del fluido para aplicar las fuerzas de arrastre y levantamiento. También, el espacio para que el fluido pueda generar turbulencia para levantar los recortes disminuye; por lo tanto, se desarrolla una capa sobre la superficie de la cama, en donde la velocidad del fluido es casi cero. En la **figura 3.9** se puede observar el efecto del tamaño de los recortes sobre la formación de la cama de recortes.

#### 3.6.2 INCLINACION DEL POZO

El efecto de la inclinación del pozo en el desarrollo de la cama es insignificante. De acuerdo con las observaciones experimentales, para 70° e inclinaciones mayores, el grosor de la cama es casi constante si las condiciones de perforación permanecen constantes. La figura **3.10** muestra el efecto de la inclinación del agujero en el desarrollo de la cama de recortes. Se puede observar que la relación entre la inclinación y el área de la cama es casi nula.

Los recortes de mayor tamaño son mas difíciles para transportar en todos los ángulos de inclinación si se esta usando fluidos de baja viscosidad. Sin embargo, es más fácil para transportarlos en ángulos bajos (0° a 50° desde la vertical) utilizando fluidos de gran viscosidad. La **figura 3.11** muestra  $V_{crit}$  como función del tamaño de los recortes y ángulo de inclinación. Como se puede observa en la figura 3.11 la  $V_{crit}$  disminuye a medida que el diámetro de los recortes aumenta y la  $V_{crit}$  se incrementa conforme el ángulo del pozo aumenta asta 60°. En la **figura 3.12**, se observa que la  $V_{crit}$  aumenta, conforme se incrementan el diámetro del agujero y el ángulo de inclinación.



## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

Cuando los recortes disminuyen en tamaño, por debajo a 0.5 mm y el ángulo de inclinación es casi horizontal, es mucho más difícil remover las partículas más pequeñas. La **figura 3.13** muestra cuando el tamaño de la partícula es casi 0.5 mm, se necesitaría una mayor velocidad para desplazar estos recortes de 0.5 mm comparado con los recortes de 5 mm.

Tomren encontró que al incrementarse el ángulo del agujero disminuye enormemente la eficiencia del transporte de recortes. El reporte que a 40° es el ángulo más difícil para la limpieza del agujero. Larsen también demostró que tanto para lodos de alta y baja viscosidad, al incrementarse la inclinación, se requiere de un gran aumento de la velocidad en el espacio anular para remover los recortes. Becker reportó que la concentración máxima fue encontrada en ángulos mayores a los 45°. El también menciona que cuando el ángulo del agujero está en el rango de 60° a 90°, tiene un efecto mínimo sobre el transporte de los recortes. La **figura 3.14** muestra  $V_{crit}$  vs ángulo del agujero (de los 45° hasta los 0° desde la horizontal). La máxima  $V_{crit}$  se presenta a los 60° y cae dramáticamente cuando el ángulo del agujero es aproximadamente 90° (posición vertical). De la gráfica se puede observar que en el rango de 150 a 170 gal/min, los recortes pueden ser transportados efectivamente a pesar del ángulo de inclinación<sup>12</sup>.

### 3.7 ROTACION DE LA TUBERIA DE PEFORACION

La rotación de la TP tiene un efecto significativo en la limpieza del agujero durante la perforación de pozos horizontales y de gran inclinación. Generalmente los recortes más pequeños, tienen mayor dificultad para ser transportados. Sin embargo, con una gran velocidad de la rotaria y lodos de gran viscosidad, los recortes pequeños pueden ser transportados fácilmente. Habitualmente en pozos de gran inclinación y horizontales, lodos de baja viscosidad limpian mejor que lodos de gran viscosidad, dependiendo del tamaño de los recortes, viscosidad, y velocidad de la rotaria<sup>15</sup>.

La rotación de la TP puede ayudar en la limpieza de los recortes perforados en el agujero. El movimiento de la TP a través de la cama de recortes, los agita y hace que se incorporen al torrente principal, donde pueden ser acarreados más fácilmente hacia arriba en el pozo desviado. La acción de doblamiento de la TP durante la rotación causa frecuentes fluctuaciones en la excentricidad de tubería de perforación. Por que no podemos determinar con exactitud la posición de la excentricidad de la TP en cualquier tiempo en particular, para los propósitos del desarrollo de modelos se deben de suponer valores para la excentricidad que caractericen la posición de la TP.

### 3.8 INDICE DE COMPORTAMIENTO DEL FLUIDO (“n”)

El índice de comportamiento del fluido “n”, tiene efectos significativos en la velocidad del fluido dentro de la tubería. En la **figura 3.15** se presenta el efecto de “n” en el desarrollo de la cama de recortes.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

Como se observa en figura 3.15, conforme “n” disminuye, el grosor de la cama se reduce debido al incremento de la velocidad sobre la superficie de la cama. Estas grandes velocidades causaran erosión sobre la cama debido a las grandes fuerzas aplicadas en la superficie de la cama hasta alcanzar una fuerza crítica, la cual es igual a la fuerza de levantamiento de los recortes de la cama<sup>11</sup>.

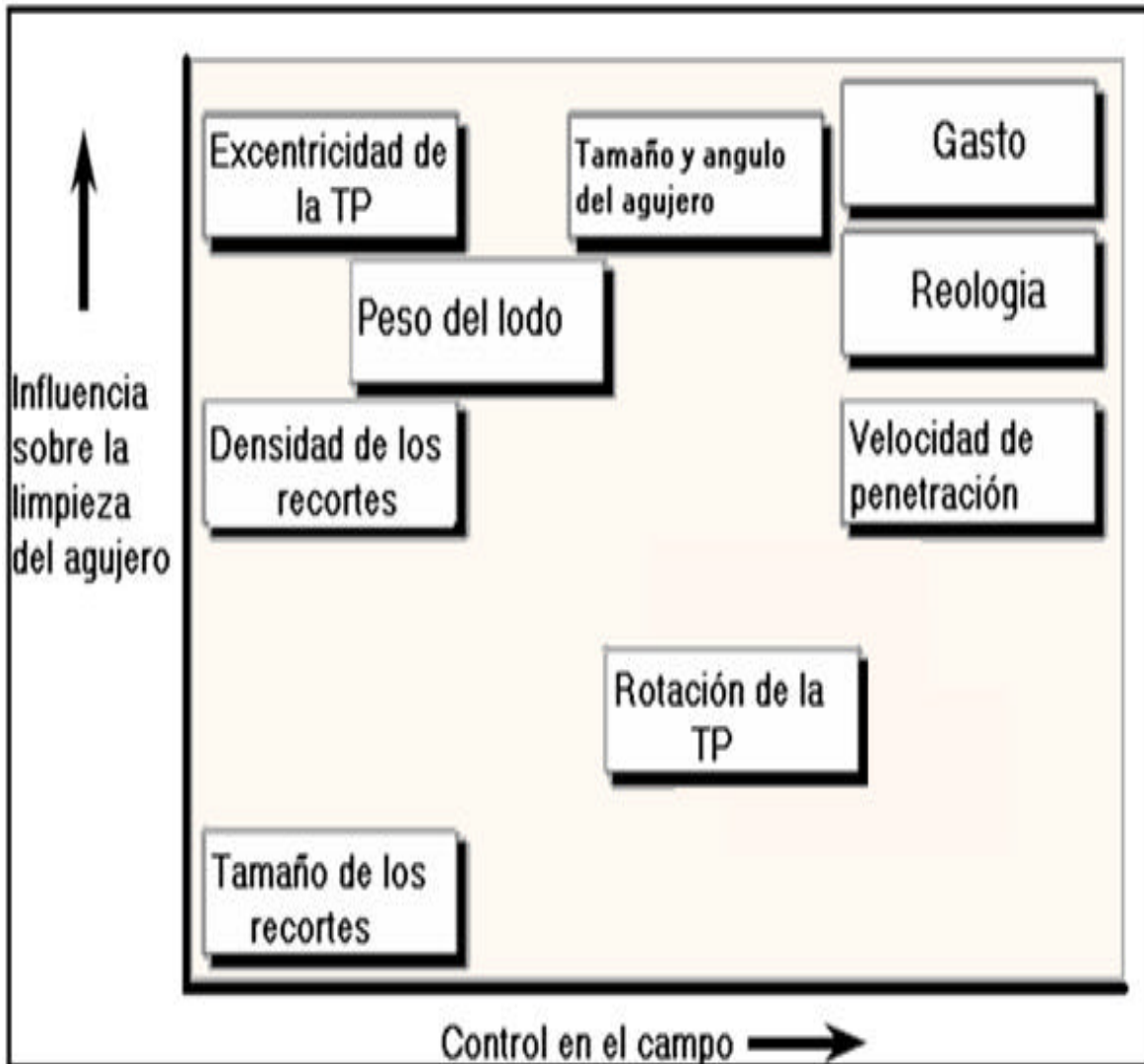


Figura 3.1 - Principales variables que influyen en el transporte de recortes

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

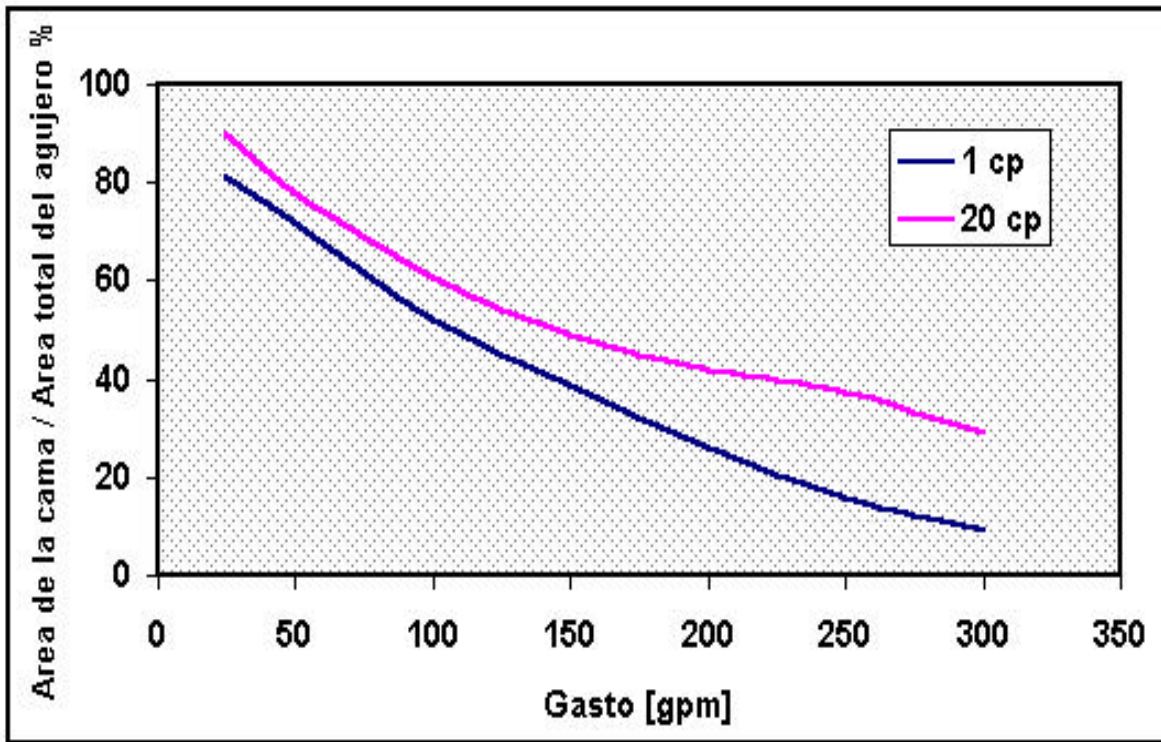


Figura 3.2- Efecto del gasto en el desarrollo de la cama de recortes.

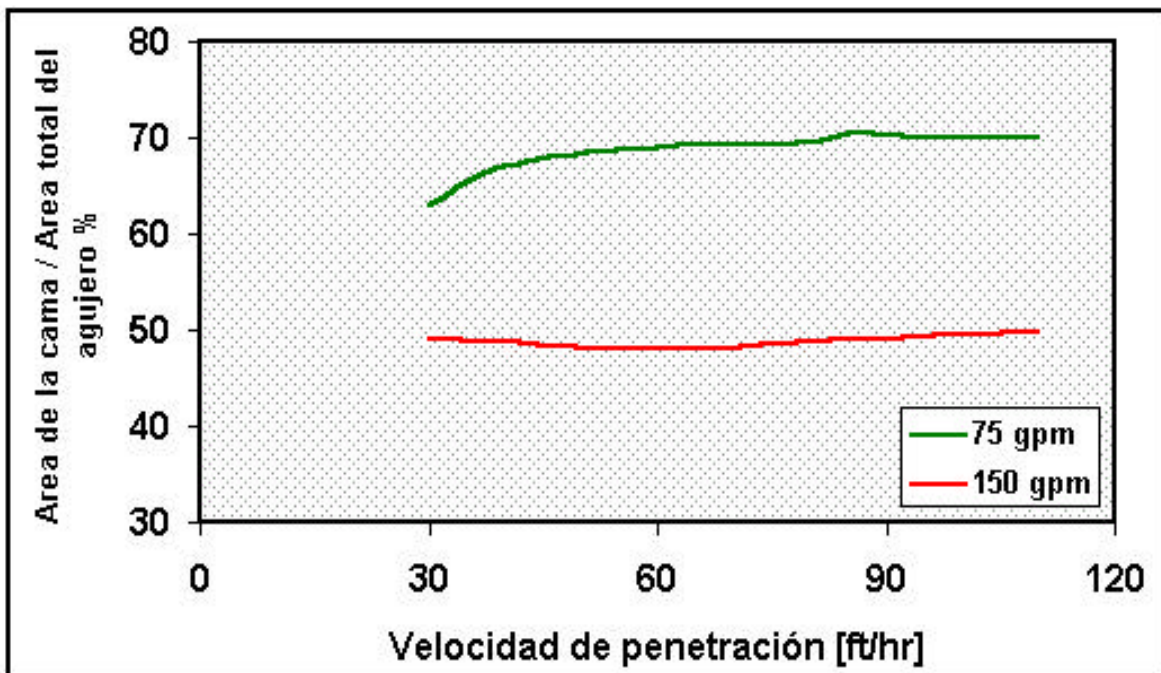


Figura 3.3- Efecto de la velocidad de penetración en el desarrollo de la cama de recortes.

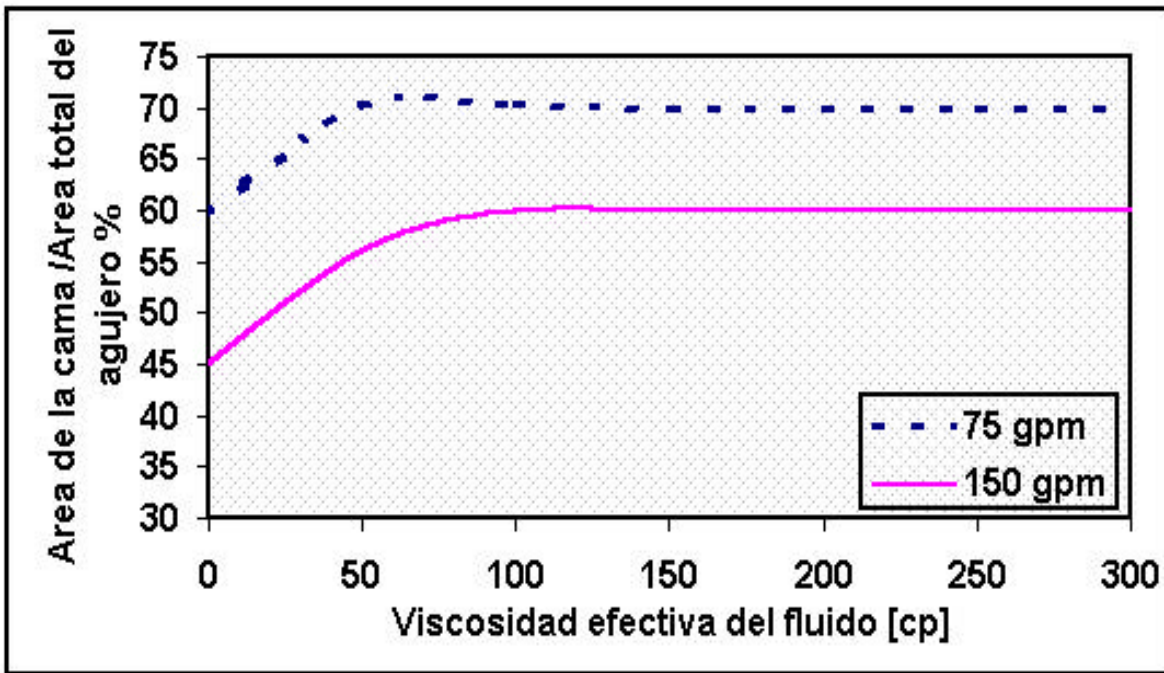


Figura 3.4- Efecto de la viscosidad efectiva del fluido en el desarrollo de la cama de recortes.

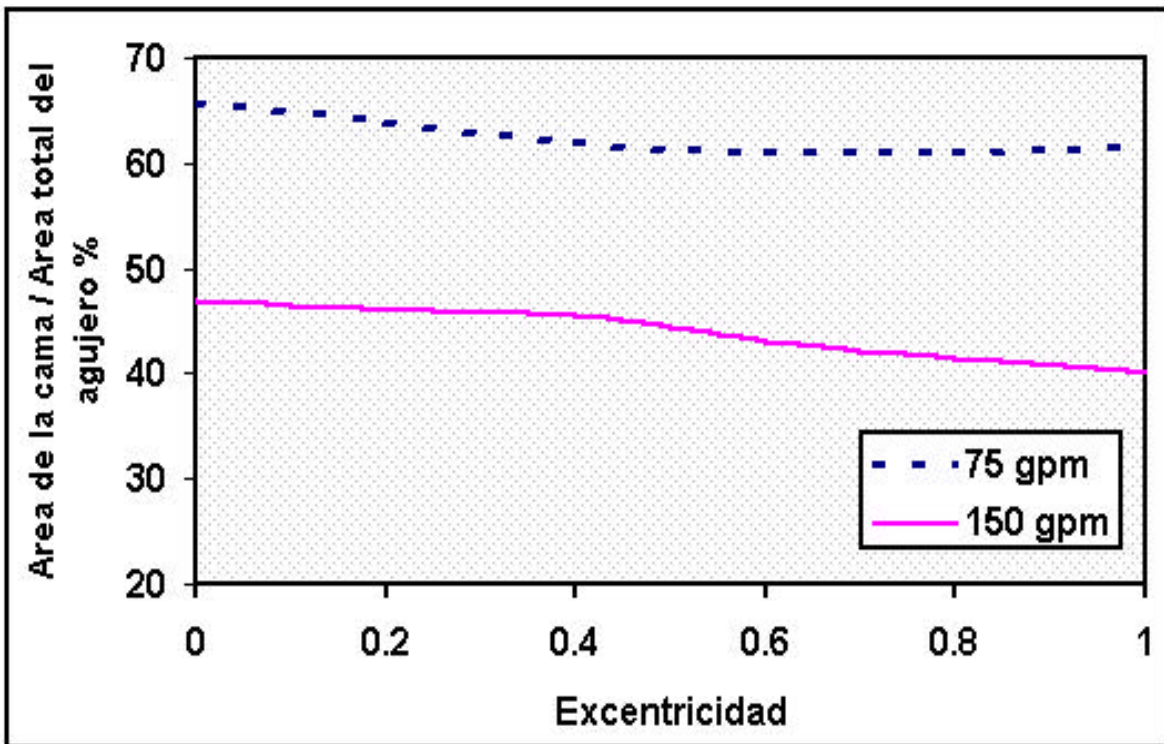


Figura 3.5- Efecto de la excentricidad en el desarrollo de la cama de recortes.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

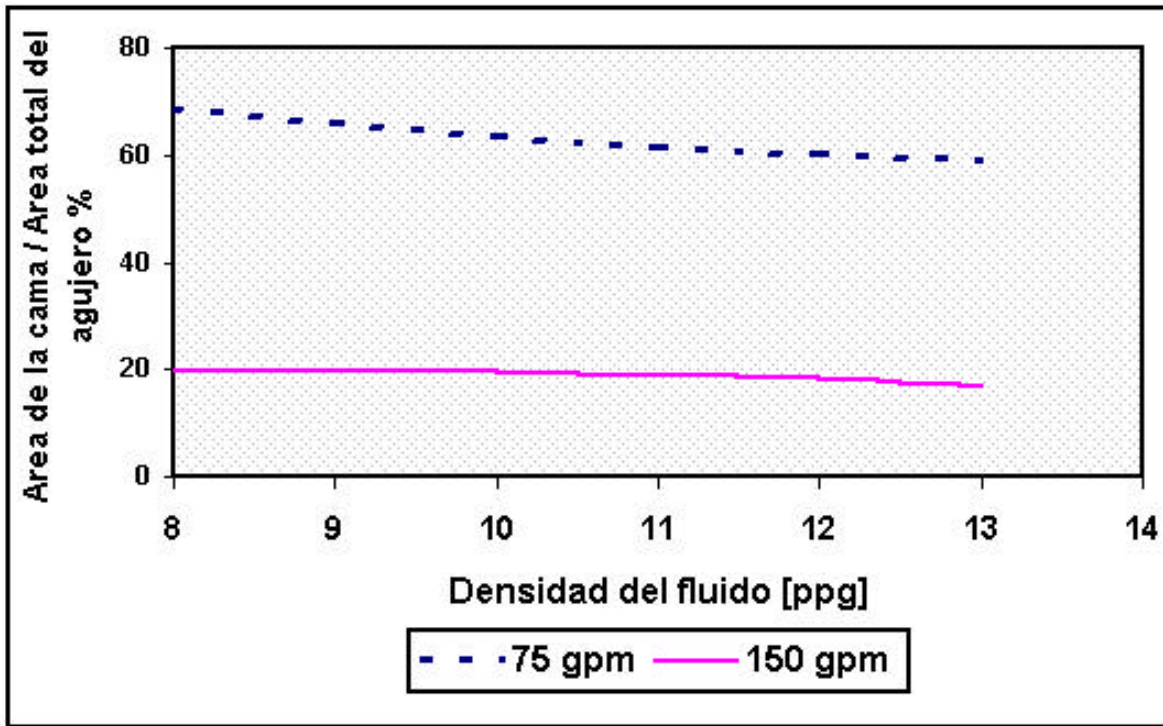


Figura 3.6- Efecto de la densidad del fluido en el desarrollo de la cama de recortes.

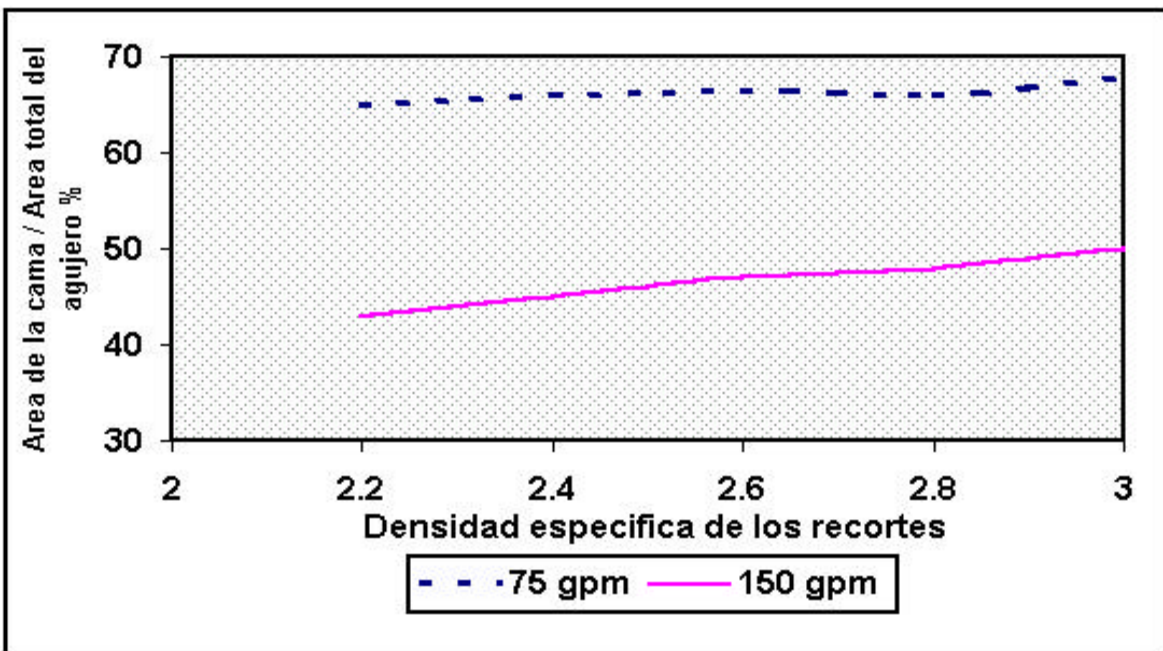


Figura 3.7- Efecto de la densidad específica en el desarrollo de la cama



## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

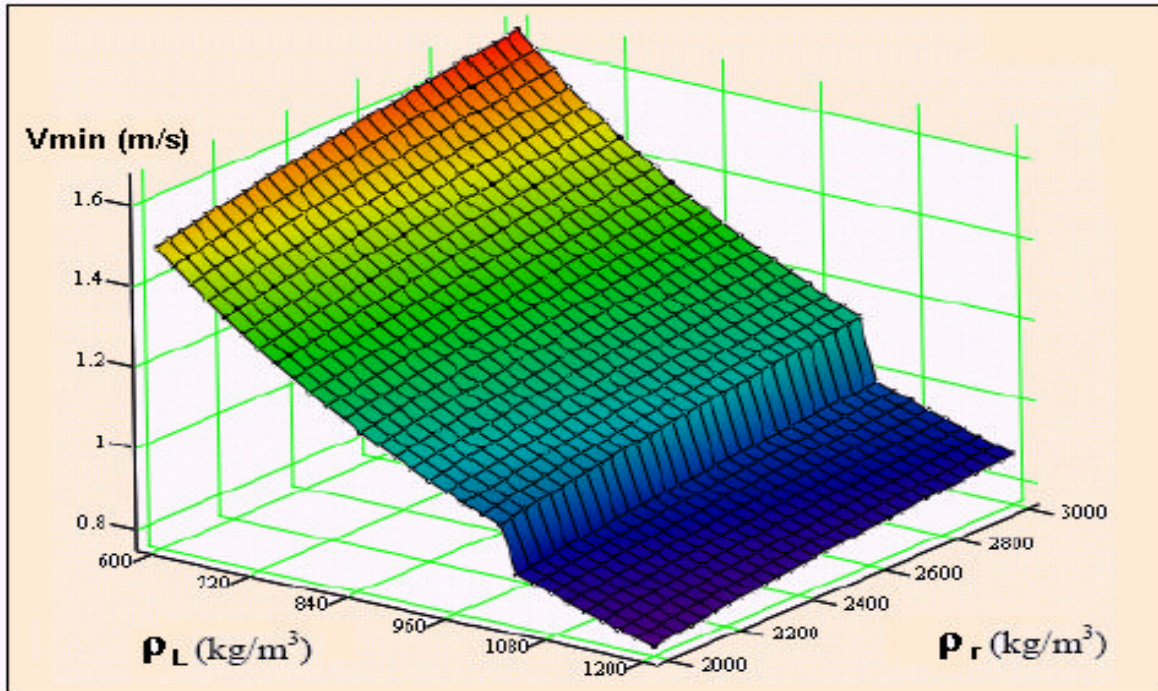


Figura 3.8- Velocidad mínima del líquido a diferentes densidades del lodo y de los recortes<sup>12</sup>.

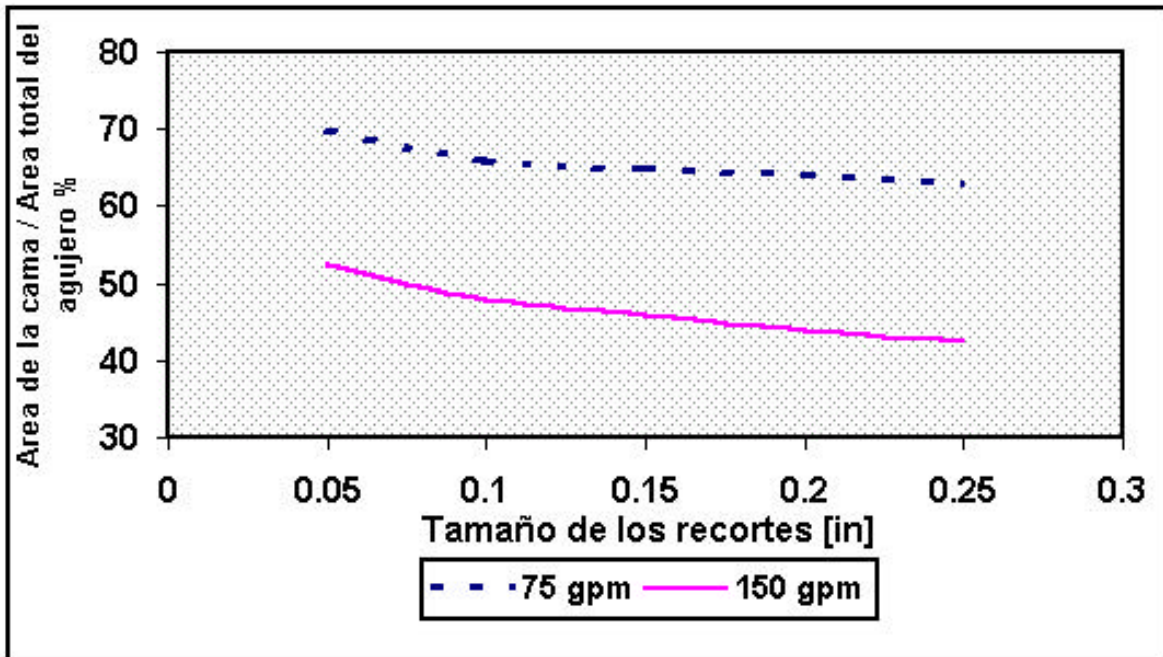


Figura 3.9- Efecto del tamaño de los recortes en el desarrollo de la cama de recortes.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

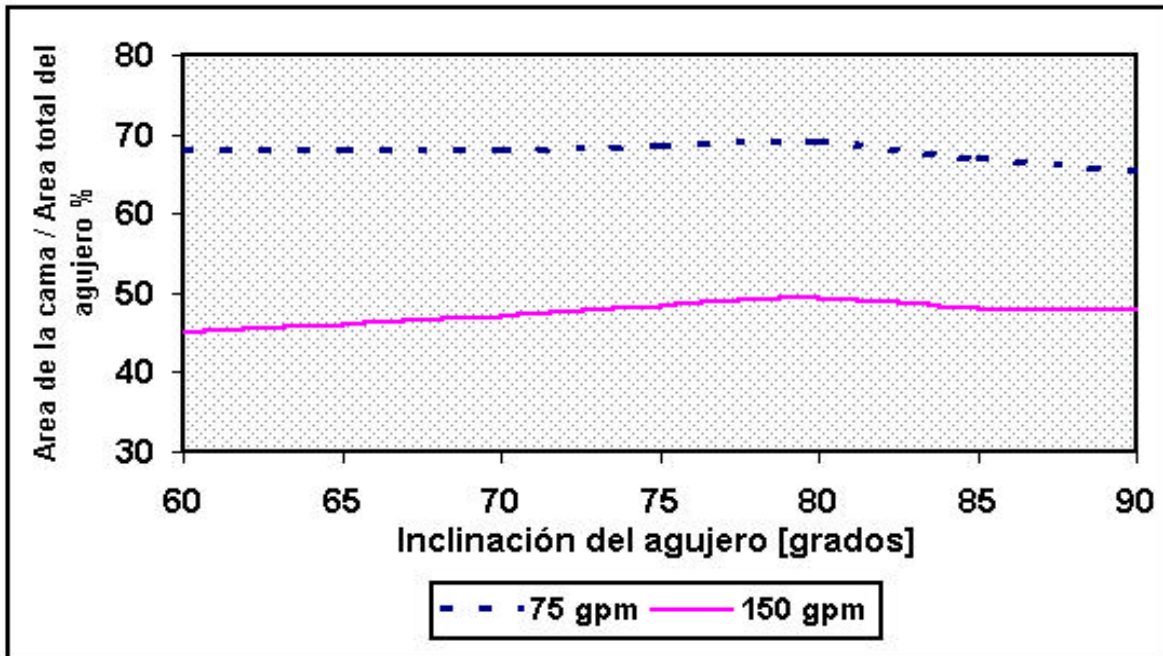


Figura 3.10- Efecto de la inclinación del agujero en el desarrollo de la cama de recortes.

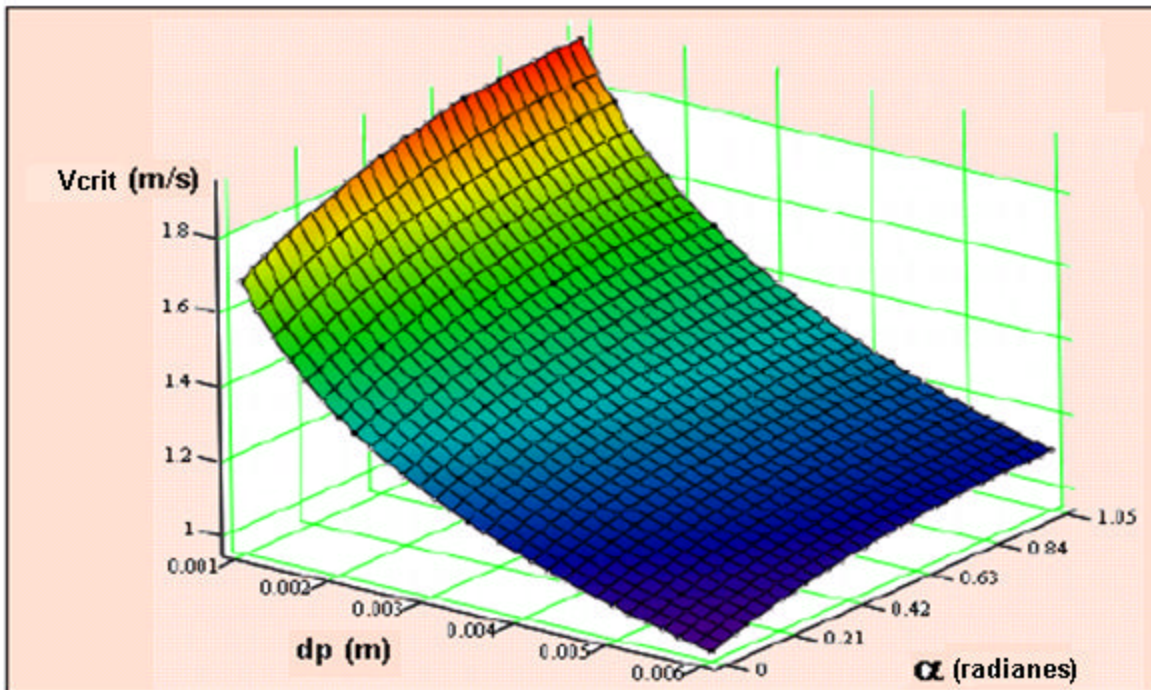


Figura 3.11-  $V_{crit}$  del lodo a diferentes ángulos del agujero y tamaños de los recortes ( $K=0.335 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$  y  $n=0.67$ )<sup>12</sup>

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

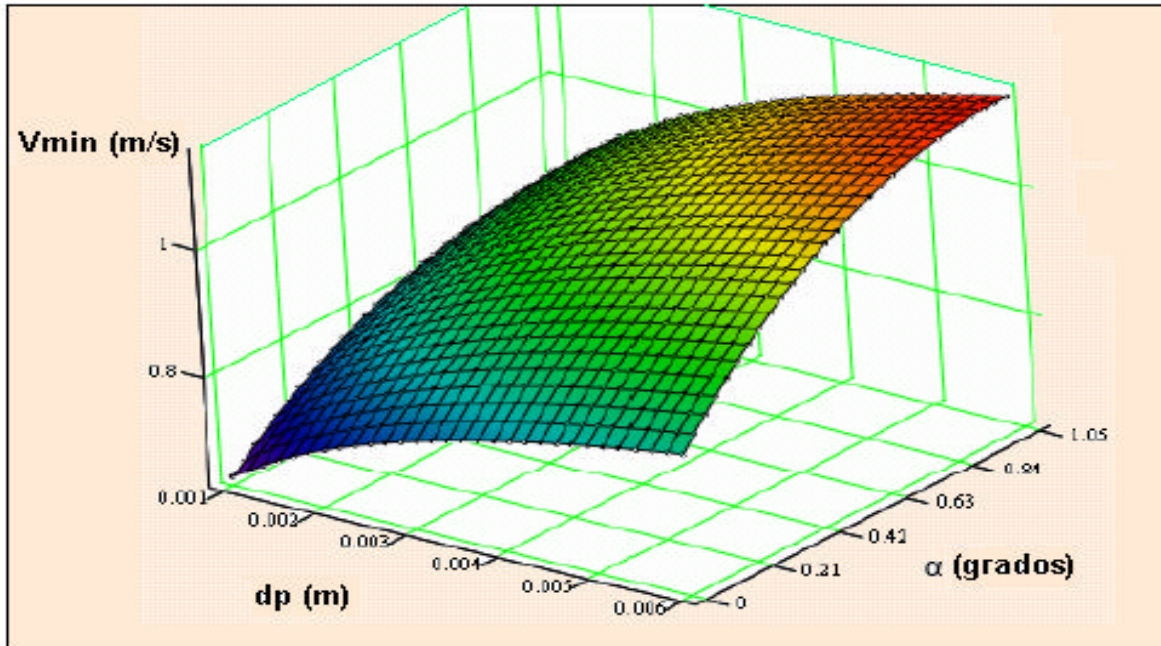


Figura 3.12- Velocidad mínima del lodo a diferentes ángulos del agujero y tamaños de los recortes ( $K=0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$  y  $n=0.67$ )<sup>12</sup>

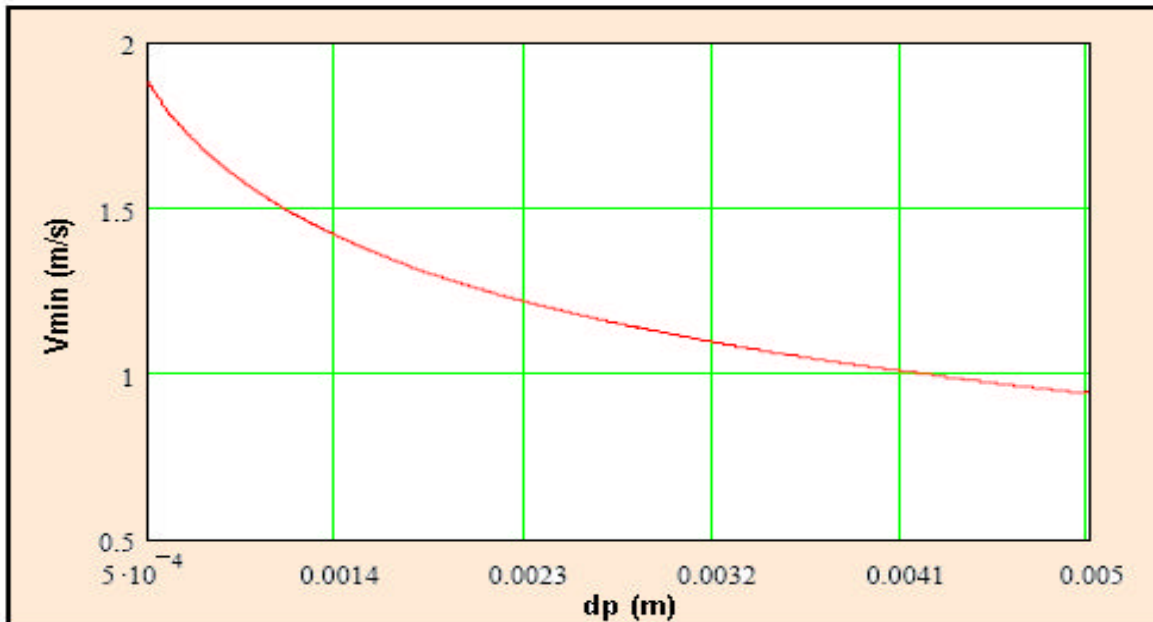


Figura 3.13- Velocidad mínima del líquido para diferentes tamaños de recortes en un pozo horizontal ( $K=0.335 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$  y  $n=0.67$ )



TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

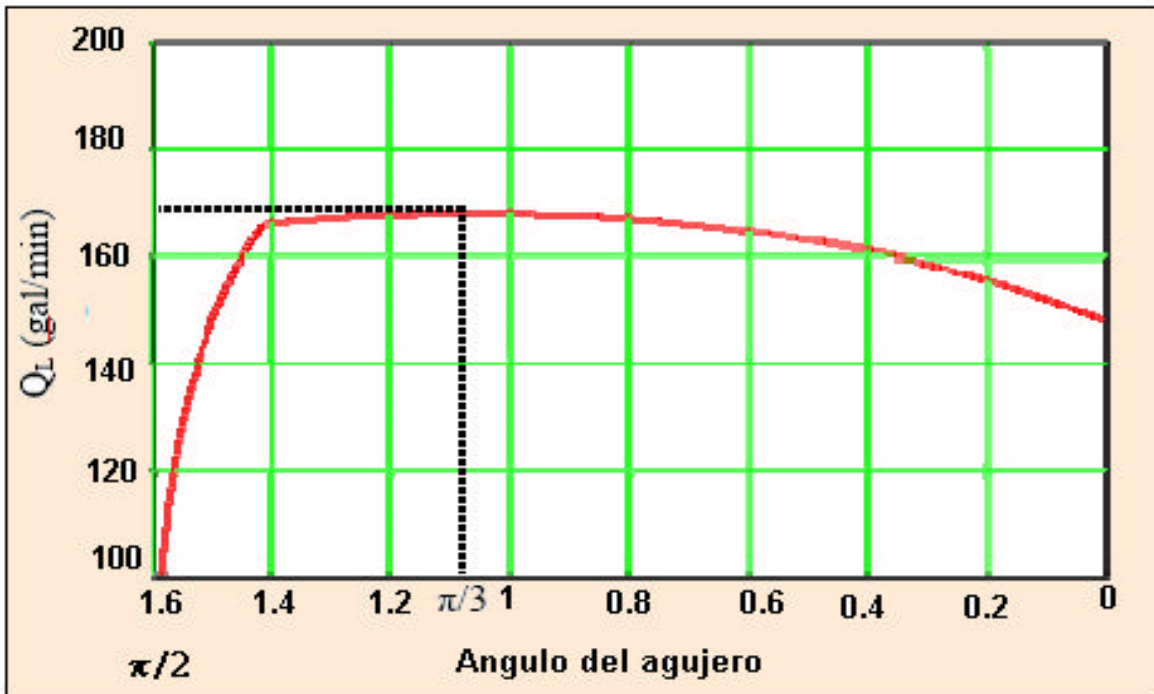


Figura 3.14-  $V_{crit}$  del liquido a diferentes ángulos del agujero ( $K=0.335 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$  y  $n=0.67$ )

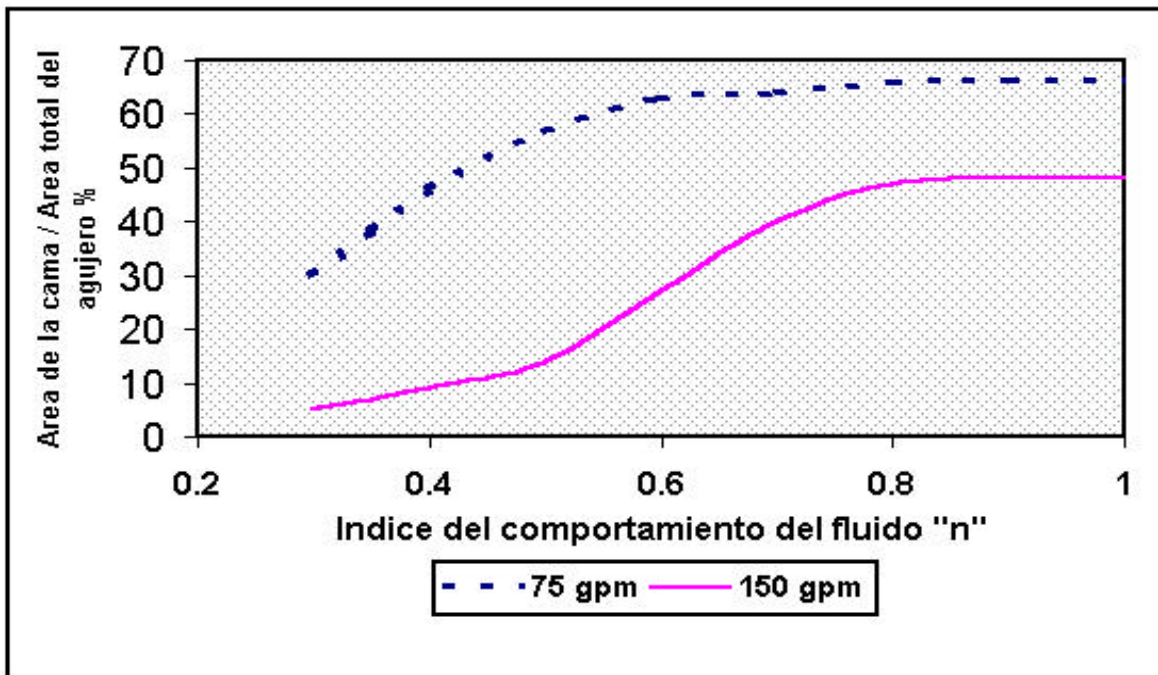


Figura 3.15- Efecto del índice de comportamiento del fluido en el desarrollo de la cama de recortes.

**CAPITULO 4**

**VELOCIDAD CRÍTICA EN EL TRANSPORTE DE  
RECORTES EN POZOS HORIZONTALES**

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

Hay muchos problemas asociados con los recortes depositados en la parte baja del agujero cuando se están perforando pozos de gran inclinación y horizontales. Para evitar estos problemas se tiene que determinar la velocidad crítica o también conocida como velocidad mínima del lodo, la cual tiene la capacidad de limpiar en forma eficiente el agujero perforado. Esta velocidad mínima del lodo es la suma de la velocidad de asentamiento y la velocidad de los recortes. La velocidad de los recortes depende de la geometría del pozo y la magnitud de la velocidad de penetración.

El lodo de perforación tiene la principal función de acarrear los recortes a la superficie y el hecho de que el método de la rotaria de perforación haya sido usado para desarrollar pozos direccionales y horizontales, ha provocado que aparezcan nuevos problemas asociados con el comportamiento del lodo de perforación en la suspensión de recortes en pozos de gran inclinación. Los problemas típicos que se pueden presentar si se forman camas de recortes en el pozo son la reducción de la velocidad de perforación y el incremento de torque y arrastre.

Este capítulo está orientado hacia la determinación del efecto de los diferentes parámetros sobre la velocidad crítica de transporte ( $V_{crit}$ ) en el espacio anular. Así como el desarrollo de una ecuación para predecir la velocidad crítica de transporte de los recortes perforados.

Dos diferentes mecanismos de transporte de recortes en pozos de gran inclinación y horizontales son identificados. El primero ocurre cuando los recortes son transportados a la superficie por rodamiento a lo largo de la parte baja del agujero y el segundo es cuando los recortes son transportados en suspensión en el fluido de circulación. El segundo mecanismo requiere una mayor velocidad del fluido, en comparación con el primero. Aunque estos dos mecanismos producen el mismo efecto (para limpiar el agujero) su respuesta a las variaciones de los parámetros de perforación es significativamente diferente <sup>22</sup>.

La velocidad del fluido en el espacio anular requerida para iniciar el transporte de recortes con cualquiera de los dos mecanismos de transporte, es sensible a las variaciones en el ángulo del agujero, pero la relación entre la velocidad del fluido requerida y el ángulo del agujero es diferente para cada uno de éstos mecanismos de transporte.

La efectividad de una circulación del fluido en la remoción de los recortes perforados, no depende únicamente de la reología del fluido, si no también del régimen de flujo, ya sea laminar o turbulento. El agua en flujo turbulento, puede ser un efectivo medio de transporte de recortes. La rotación de la tubería tiene un efecto muy pequeño sobre la velocidad del fluido requerida para transportar los recortes cuando se está circulando agua, pero reduce significativamente la velocidad del fluido, cuando se están circulando fluidos de gran viscosidad <sup>22</sup>.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

Uno de los métodos para estimar la  $V_{crit}$ , es el desarrollado por T.I. Larsen, A.A. Pilehvari y J.J. Azar el cual es valido únicamente para pozos de 55° a 90° de inclinación. Hay tres principales parámetros los cuales afectan el transporte de recorte, estos son: (1) velocidad de asentamiento ( $V_{as}$ ), es la velocidad donde los recortes comienzan a asentarse en el agujero; (2) velocidad de los recortes ( $V_r$ ); (3) velocidad crítica ( $V_{crit}$ ), es la suma de la velocidad de asentamiento y la velocidad de los recortes.

Larsen considero que 3 parámetros afectan la determinación de la  $V_{crit}$  para agujeros inclinados, estos son<sup>23</sup>:

- 1) La Inclinación
- 2) La velocidad de perforación
- 3) La densidad

Donde la velocidad de penetración a sido representada por la  $V_r$ .

El modelo determina la  $V_{crit}$  del fluido para el transportes de recortes y la velocidad promedio de los recortes ( $V_r$ ). Este modelo le permitirá al ingeniero de perforación seleccionar la hidráulica apropiada para evitar la acumulación de recortes en la perforación de pozos de gran inclinación y horizontales.

### 4.1 COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD CRÍTICA<sup>22</sup>

El agujero será limpiado totalmente si todos los recortes se están moviendo hacia la parte central del agujero durante la circulación. La velocidad mínima o  $V_{crit}$  de transporte es una medida de la capacidad de acarreo de los fluidos de perforación. Esta capacidad, por supuesto dependerá de todos los parámetros, los cuales afectan el transporte del lodo: propiedades reologicas de los fluidos de perforación, ángulo del agujero, excentricidad de la tubería, tamaño de los recortes, etc.

Los dos diferentes mecanismos de transporte satisfacen los requerimientos mencionados anteriormente. En el primero los recortes son transportados por rodamiento o deslizamiento a lo largo de la parte baja del espacio anular y son llevados hacia arriba del agujero. El segundo es donde los recortes son transportados en suspensión en el fluido. Estos dos mecanismos han dado como resultado en la definición de dos  $V_{crit}$  del fluido, las cuales satisfacen la definición de  $V_{crit}$ . Una es la velocidad requerida para iniciar y mantener en rodamiento o deslizamiento los recortes a lo largo de la parte baja del agujero - $V_{crit}$  por rodamiento o deslizamiento de recortes. La otra es, generalmente mayor, la velocidad del fluido en la cual se mantienen en suspensión los recortes en el fluido de circulación -  $V_{crit}$  para recortes en suspensión.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

### 4.1.1 DEFINICIÓN DE LA $V_{crit}$ POR RODAMIENTO DE LOS RECORTES

La velocidad mínima de transporte por rodamiento o deslizamiento, es la velocidad a la cual todos los recortes son girados o desplazados a lo largo de la parte baja del agujero.

### 4.1.2 DEFINICIÓN DE LA $V_{crit}$ PARA LA SUSPENSION DE LOS RECORTES

La velocidad  $V_{crit}$  de transporte para los recortes en suspensión, es la velocidad a la cual todos los recortes son suspendidos y transportados hacia arriba junto con el medio de transporte.

### 4.1.3 $V_{crit}$ PARA INICIAR EL RODAMIENTO DE LOS RECORTES

En agujeros con ángulos muy bajos ( $< 30^\circ$ ) existe una tendencia de la cama de recortes para el deslizamiento hacia la parte baja del agujero, por lo tanto es casi imposible establecer si existe la formación de una cama de recortes y es sumamente difícil definir el punto en el cual el transporte por rodamiento fue iniciado.

Se puede observar en la **Figura 4.1** que arriba de  $30^\circ$  la  $V_{crit}$  requerida para iniciar el rodamiento de los recortes en el espacio anular, aumenta conforme el ángulo del agujero se incrementa. Sin embargo, la  $V_{crit}$  requerida para transportar los recortes alcanza un valor máximo, el cual disminuye conforme el ángulo del agujero se incrementa.

Puede verse en la **figura 4.3** que cuando se están usando fluidos de viscosidad media y alta, la rotación de la tubería disminuye significativamente la  $V_{crit}$  para el rodamiento de los recortes.

De la **figura 4.5** se puede observar que el tamaño de los recortes incrementa la  $V_{crit}$  requerida para transportar los recortes por rodamiento.

### 4.1.4 $V_{crit}$ PARA INICIAR LA SUSPENSION DE LOS RECORTES

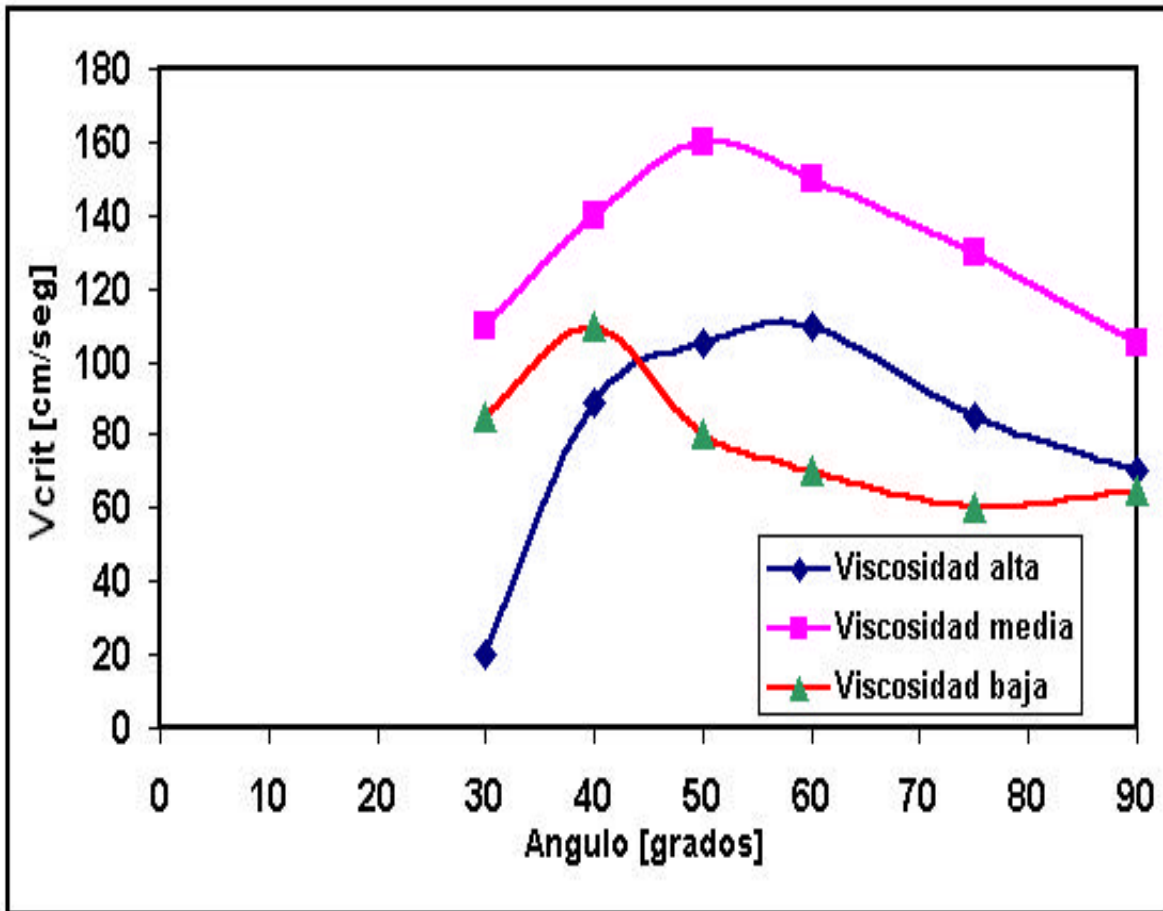
En general puede verse en la **figura 4.2** que la  $V_{crit}$  requerida para iniciar la suspensión de los recortes, depende en menor grado de las propiedades reológicas del fluido, en comparación con la  $V_{crit}$  por rodamiento. También se puede observar que la  $V_{crit}$  para cualquier fluido, no afecta en gran medida en pozos con ángulos arriba de  $40^\circ$ .

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

De la **figura 4.2** puede observarse que en todos los ángulos, los fluidos de viscosidad media requieren una mayor  $V_{crit}$  para transportar los recortes en suspensión, que los fluidos de gran viscosidad.

Puede verse en la **figura 4.4** que cuando se usan fluidos de viscosidad media o alta, la rotación de la tubería disminuye significativamente la  $V_{crit}$  para los recortes en suspensión.

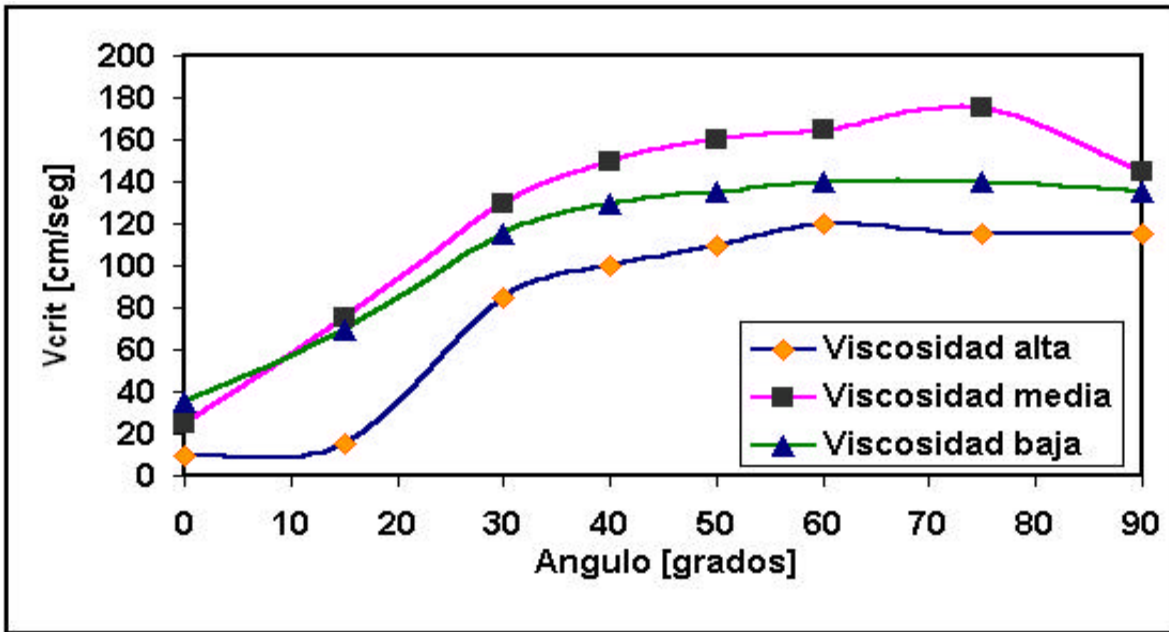
Puede verse en la **figura 4.6** que a medida que el tamaño de los recortes se incrementa la  $V_{crit}$  requerida para transportar los recortes en suspensión, aumenta.



Tamaño de los recortes: 1.7-2 mm, Excentricidad: 0%, Velocidad de la rotaria: 0rpm

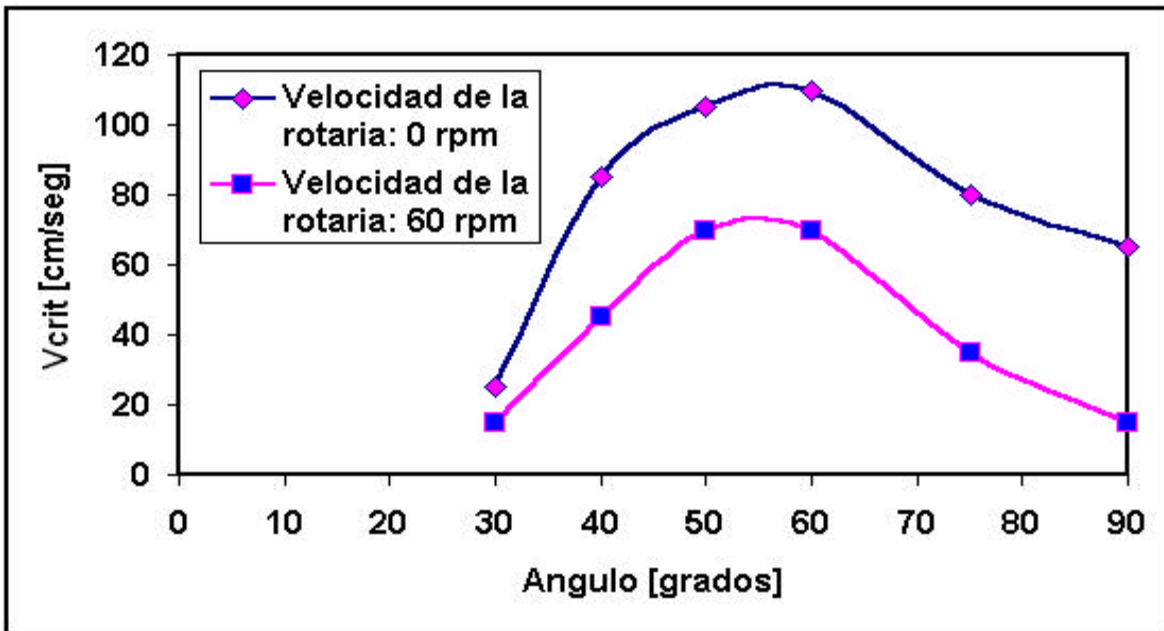
**Figura 4.1-Efecto de la reología del fluido sobre el rodamiento de los recortes a diferentes ángulos del pozo.**

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES



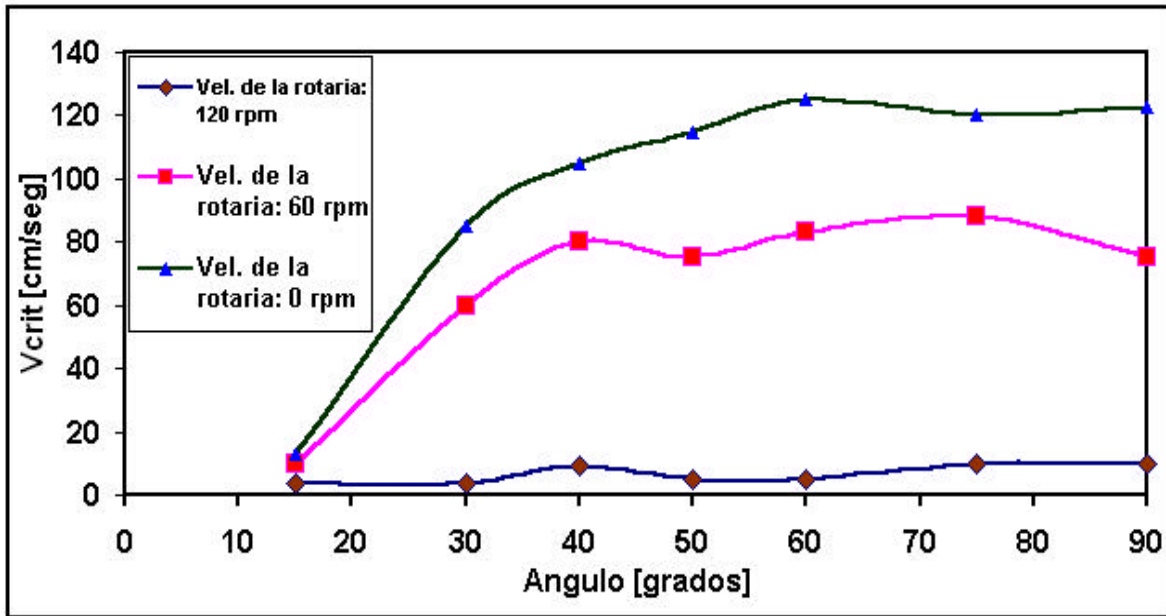
Tamaño de los recortes: 1.7-2 mm, Excentricidad: 0%, Velocidad de la rotaria: 0rpm

Figura 4.2- Efecto de la reología del fluido sobre la suspensión de los recortes a diferentes ángulos del pozo.



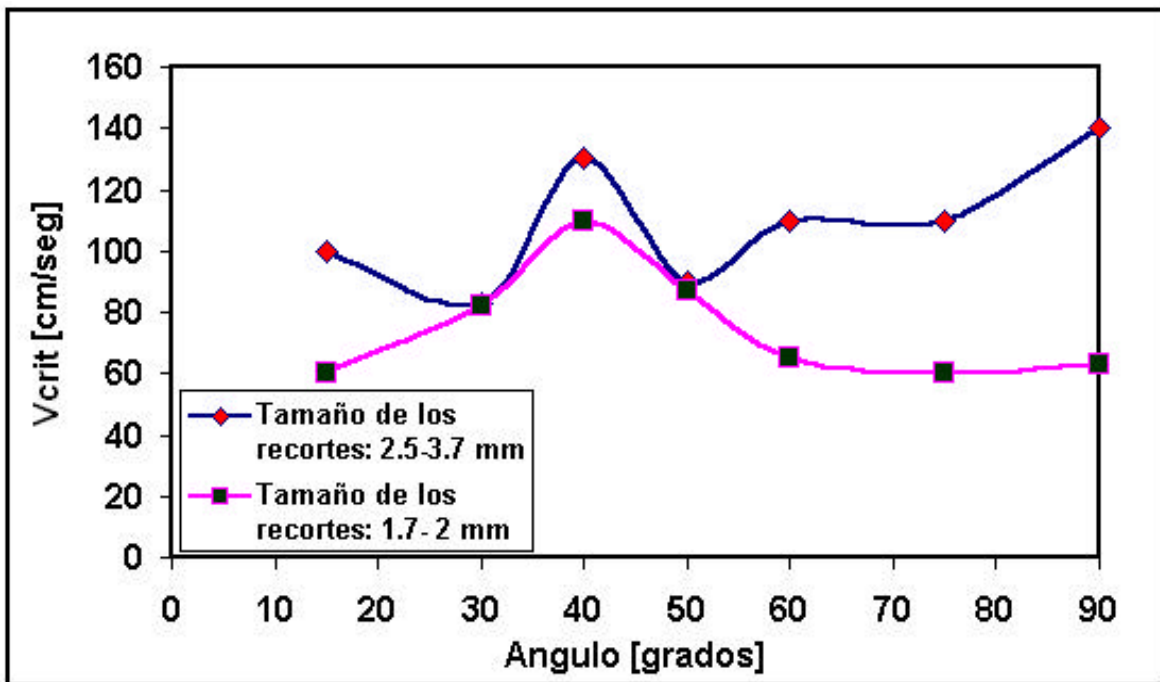
Tamaño de los recortes: 1.7-2 mm, Excentricidad: 0%, Fluido de alta viscosidad

Figura 4.3-Efecto de la rotación de la tubería sobre el rodamiento de los recortes a diferentes ángulos del pozo.



Tamaño de los recortes: 1.7-2 mm, Excentricidad: 0%, Fluido de alta viscosidad

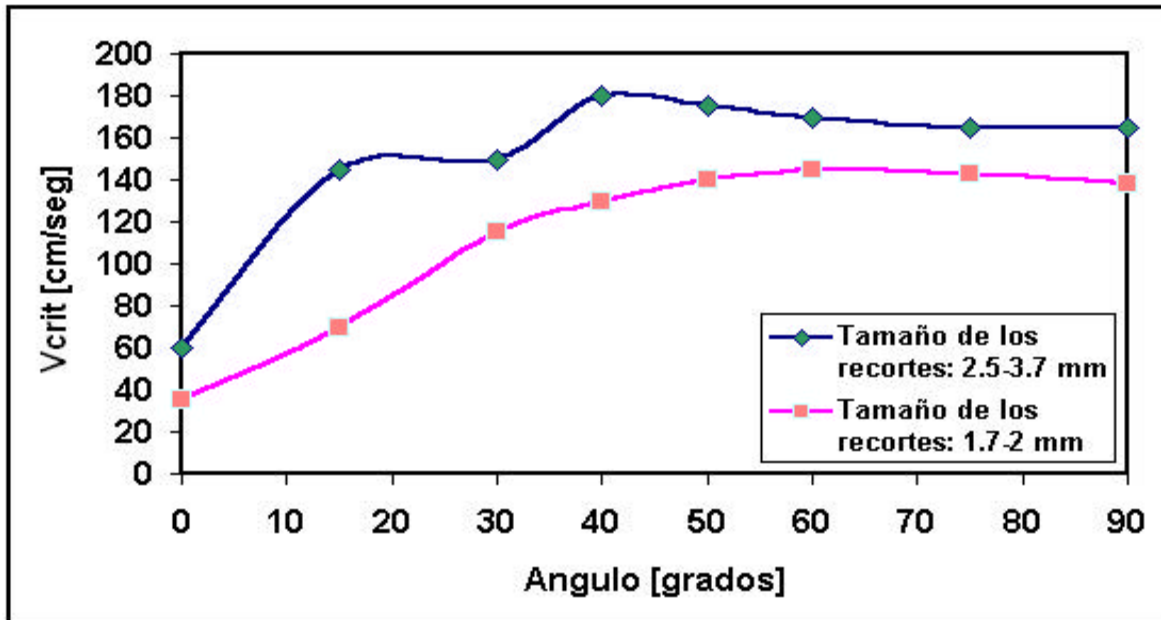
Figura 4.4-Efecto de la rotación de la tubería sobre la suspensión de los recortes a diferentes ángulos del pozo.



Velocidad de la rotaria: 0 rpm, Excentricidad: 0%, Fluido de baja viscosidad

Figura 4.5-Efecto del tamaño de los recortes sobre la  $V_{crit}$  para el rodamiento de los recortes a diferentes ángulos del pozo.





Velocidad de la rotaria: 0 rpm, Excentricidad: 0%, Fluido de baja viscosidad

Figura 4.6-Efecto del tamaño de los recortes sobre la  $V_{crit}$  para la suspensión de los recortes a diferentes ángulos del pozo.

#### 4.2 DESARROLLO DE LA ECUACION PARA PREDECIR LA VELOCIDAD CRÍTICA <sup>19</sup>.

La  $V_{crit}$  se define como la velocidad mínima del fluido requerida para mantener en continuo movimiento a los recortes. En otras palabras, la  $V_{crit}$  es la velocidad del fluido a la cual no hay acumulación de recortes en la parte baja del agujero.

Se puede demostrar que la velocidad de transporte de los recortes puede ser expresada completamente con un balance de masa sobre los recortes:

$$M_{gb} = M_{il} \dots \dots \dots (1)$$

Donde

$$M_{gb} = g_r Q_{iny} \dots \dots \dots (2)$$

$$M_{il} = V_r A_{an} C_{conc-fr} g_r \dots \dots \dots (3)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2) y (3) en (1) se tiene:

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

$$g_r Q_{iny} = V_r A_{an} C_{conc-fr} g_r \dots \dots \dots (4)$$

Despejando la  $V_r$  de la ecuación (4):

$$V_r = \frac{Q_{iny}}{A_{an} C_{conc-fr}} \dots \dots \dots (5)$$

Convirtiendo el  $Q_{iny}$  (gasto de inyección volumétrico) a ROP:

$$R_p \left( \frac{ft}{hr} \right) = Q_{iny} \left( \frac{ft^3}{seg} \right) \left( \frac{3600seg}{hr} \right) \left( \frac{1}{A_{agujero} ft^2} \right) \dots \dots \dots (6)$$

Sustituyendo  $Q_{iny}$  de la ecuación 6, dentro de la ecuación 5:

$$V_r = \frac{R_p}{36 \left[ 1 - \left( \frac{A_{TP}}{A_{agujero}} \right) \right] C_{conc}} \dots \dots \dots (7)$$

O en términos del diámetro

$$V_r = \frac{R_p}{36 \left[ 1 - \left( \frac{D_{TP}}{D_{agujero}} \right)^2 \right] C_{conc}} \dots \dots \dots (8)$$

De datos experimentales se ha encontrado que:

$$C_{conc} = 0.01778R_p + 0.505 \dots \dots \dots (9)$$

Combinando la ecuaciones (8) y (9), la ecuación queda expresada de la siguiente manera:

**TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES**

$$V_R = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{D_{TP}}{D_{agujero}}\right)^2\right] \left(0.64 + \frac{18.16}{R_p}\right)} \dots\dots\dots(10)$$

La  $\bar{V}_{as}$  puede ser obtenida calculando la viscosidad aparente (ecuación 13).

$$\bar{V}_{as} = 0.00516m_a + 3.006 \text{ Para } m_a < 53cp, \dots\dots\dots(11)$$

$$\text{Y } \bar{V}_{as} = 0.02554(m_a - 53) + 3.28 \text{ para } m_a > 53cp, \dots\dots\dots(12)$$

Donde la viscosidad aparente esta dada por<sup>13</sup>:

$$m_a = m_p + \frac{5Y_p(D_{agujero} - D_{TP})}{V_{crit}} \dots\dots\dots(13)$$

Para generalizar estas ecuaciones han sido introducidos los factores de corrección por ángulo de inclinación, tamaño de recorte y peso del lodo.

$$C_{ang} = 0.0342q_{ang} - 0.000233q_{ang}^2 - 0.213 \dots\dots\dots(14)$$

$$C_{tr} = -1.04D_{50r} + 1.286 \dots\dots\dots(15)$$

$$C_{pl} = 1 - 0.0333(g_l - 8.7) \text{ para } g_l > 8.7 \dots\dots\dots(16)$$

$$\text{Y } C_{pl} = 1.0 \text{ para } g_l < 8.7 \dots\dots\dots(17)$$

Por lo tanto la ecuación generalizada para determinar el valor de la  $V_{as}$  es la siguiente:

$$V_{as} = \bar{V}_{as} C_{ang} C_{tr} C_{pl} \dots\dots\dots(18)$$

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

La velocidad crítica ( $V_{crit}$ ) puede ser determinada al sumar la velocidad de los recortes ( $V_r$ ) y la velocidad de asentamiento ( $V_{as}$ ).

$$V_{crit} = V_r + V_{as} \dots\dots\dots(19)$$

### 4.3 EJEMPLO

Calcular la  $V_r$  y  $V_{crit}$  a un gasto de 110 gal/min utilizando el modelo desarrollado, dadas las condiciones de la **tabla A- 4.1**.

#### Predicción de la $V_{crit}$

Concentración de recortes a la  $V_{crit}$ . Utilizando la ecuación 9

$$C_{conc} = 0.0178 \times 54 + 0.505 = 1.47\% \dots\dots\dots(A-1)$$

Promedio de la  $V_r$  a la  $V_{crit}$ . Usando la ecuación 8

$$V_r = \frac{54}{36 \left[ 1 - \left( \frac{2.375}{5.0} \right)^2 \right] 1.47} = 1.32 \text{ ft/seg} \dots\dots\dots(A-2)$$

Para encontrar la velocidad equivalente de asentamiento, la viscosidad aparente tiene que ser calculada. La viscosidad aparente puede ser calculada estimando la  $V_{crit}$  e iterando hasta que se haya obtenido un valor aceptable. Primero, la velocidad equivalente de asentamiento tiene que ser calculada, por ejemplo, 3.3 ft /seg. La velocidad equivalente de asentamiento estimada será sumada a la  $V_r$  (de la ecuación A-2), como lo muestra la ecuación 19.

$$V_{crit-est} = 1.32 + 3.30 = 4.62 \text{ ft/ seg} \dots\dots\dots(A-3)$$

Utilizando la ecuación 13 para calcular la viscosidad aparente estimada,

$$m_a = 7 + \frac{5 \times 7 \times (5.0 - 2.375)}{4.62} = 26.9 \text{ cp} \dots\dots\dots(A-4)$$

Utilizando la ecuación 11 para calcular una nueva velocidad equivalente de asentamiento,

$$\bar{V}_{as} = 0.00516 \times 26.9 + 3.006 = 3.14 \text{ ft/ seg} \dots\dots\dots(A-5)$$

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

Para una mejor exactitud, el valor calculado de  $V_{as}$  de la ecuación A-5 es usada para calcular una nueva viscosidad aparente, usando la ecuación 19 una vez más,

$$V_{critical} = 1.32 + 3.14 = 4.46 \text{ ft/seg} \dots\dots\dots (A-6)$$

La nueva viscosidad aparente (con la ecuación 13),

$$m_a = 7 + \frac{5 \times 7 \times (5.0 - 2.375)}{4.46} = 27.6 \text{ cp} \dots\dots\dots (A-7)$$

Calcular la nueva velocidad equivalente de asentamiento, (con la ecuación 11)

$$\bar{V}_{slip} = 0.00516 \times 27.6 + 3.006 = 3.15 \text{ ft/seg} \dots\dots\dots (A-8)$$

Comparando los resultados de las ecuaciones A-5 y A-8, podemos observar que la diferencia es muy pequeña. Por lo tanto en los cálculos subsecuentes se usara el valor de la ecuación A-8.

**Factor de corrección por ángulo de inclinación.** Utilizando la ecuación 14 obtenemos:

$$C_{ang} = 0.0342 \times 65 - 0.000233 \times 65^2 - 0.213 = 1.026 \dots\dots\dots (A-9)$$

**Factor de corrección por tamaño de recorte.** Utilizando la ecuación 15 obtenemos:

$$C_{tr} = -1.04 \times 0.175 + 1.286 = 1.10 \dots\dots\dots (A-10)$$

**Factor de corrección por el peso de lodo.** No es necesario corregir por el peso de lodo por que este es menor a 8.70 ppg. Los factores de corrección pueden ser encontrados utilizando las ecuaciones 16 y 17. En este caso:

$$C_{pl} = 1.0 \dots\dots\dots (A-11)$$

La velocidad equivalente de asentamiento corregida es encontrada por la combinación de todos los factores de corrección, como se muestra en la ecuación 18.

$$V_{as} = 3.15 \times 1.026 \times 1.10 \times 1.0 = 3.56 \text{ ft/seg} \dots\dots\dots (A-12)$$

Sumar la  $V_r$  a la velocidad equivalente de asentamiento para obtener la  $V_{crit}$ , como se muestra en la ecuación 19.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

$$V_{crit} = 1.32 + 3.56 = 4.88 \text{ ft / seg} \dots\dots\dots(A - 13)$$

La  $V_{crit}$  necesita ser convertida a gasto para compararlo con el gasto de bombeo con el cual se esta operando.

Convirtiendo la  $V_{crit}$  a gasto. El área de la sección transversal del espacio anular es  $A_{an} = 0.10559 \text{ ft}^2$

$$Q_{crit} = (4.88 \frac{\text{ft}}{\text{seg}}) (\frac{60 \text{seg}}{1 \text{min}}) (\frac{7.48 \text{gal}}{1 \text{ft}^3}) (0.10559 \text{ft}^2)$$

$$Q_{crit} = 231 \text{gal / min} \dots\dots\dots(A - 14)$$

Por lo tanto, comparando el gasto obtenido con el modelo y el gasto de operación se puede determinar que los recortes se acumularan en el agujero porque el gasto critico de 231 gpm, es más alto que el gasto de bombeo en operación que es de 110 gpm.

Tabla A- 4.1 Parámetros del lodo de perforación	
Punto de cedencia, $Y_p, lb_f / 100 ft^2$	7
Viscosidad plástica, $m_p, cp$	7
Gasto, gal/min.	110
Angulo, °	65
Tamaño de los recortes, $D_{50r}, in$	0.175
Peso del lodo, lbm/gal	8.57
Velocidad de penetración, ft/hr	54
Diámetro del agujero, $D_{agujero}, in$	5
Diámetro de la TP, $D_{TP}, in$	2.375
Porosidad de la cama, %	36

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

### NOMENCLATURA

$A_{an}$  = Área del espacio anular,  $ft^2$

$A_{agujero}$  = Área del agujero perforado,  $ft^2$

$A_{TP}$  = Área de la tubería de perforación,  $ft^2$

$C_{anG}$  = Factor de corrección por ángulo de inclinación, adimensional

$C_{conc}$  = Concentración de recortes, %

$C_{conc-fr}$  = Concentración de recortes fraccional, adimensional

$C_{pl}$  = Factor de corrección por peso del lodo, adimensional

$C_{tr}$  = Factor de corrección por el tamaño de los recortes, adimensional

$D_{50r}$  = Tamaño promedio de los recortes, pg

$D_{agujero}$  = Diámetro del agujero perforado, pg

$D_{TP}$  = Diámetro de la TP, pg

$M_{gb}$  = Masa generada por la barrena, lbm

$M_{il}$  = Masa transportada por el lodo, lbm

$Q_{iny}$  = Gasto volumétrico inyectado,  $ft^3 / seg$

$R_p = ROP$  = velocidad de penetración, ft/hr

$V_{crit}$  = Velocidad crítica, ft/seg

$V_{crit-est}$  = velocidad crítica estimada, ft/seg.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

$V_r$  = Velocidad de los recortes, ft/seg.

$V_{as}$  = Velocidad de asentamiento corregida por ángulo, tamaño de recorte y peso del lodo, ft/seg.

$\bar{V}_{as}$  = Velocidad de asentamiento sin corrección, ft/seg.

$Y_p$  = Punto de cedencia basado sobre 600 y 300 rev/min. en el viscosímetro fann,

$g_r$  = Densidad de los recortes,  $lbm/ft^3$

$g_l$  = Densidad del lodo,  $lbm/gal$

$\mu_a$  = Viscosidad aparente, cp

$\mu_p$  = Viscosidad plástica basada sobre 300 y 600 rev/min. en el viscosímetro fann, cp



**CAPITULO 5**

**OPTIMIZACION DE LAS PROPIEDADES DEL  
FLUIDO DE PERFORACION PARA UNA LIMPIEZA  
EFECTIVA DEL AGUJERO EN POZOS  
HORIZONTALES**

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

En este capítulo se determinan las propiedades óptimas del fluido de perforación y el gasto, para minimizar la altura de la cama de recortes, así como el tiempo de circulación en pozos de gran inclinación y horizontales.

Con el incremento en las profundidades y los desplazamientos horizontales en los pozos de alcance extendido. Ha sido reconocido por muchos años que el transporte de recortes en la perforación de pozos de gran inclinación involucra problemas especiales. Los recortes pueden asentarse por fuerzas de gravedad a lo largo del fondo del agujero. Como los recortes se asientan en el fluido de perforación, una cama de sólidos es formada a lo largo del agujero. El fracaso de una buena limpieza puede causar severos problemas de perforación. Uno de los más complicados de estos problemas es que se pegue la TP. La solución a esta condición puede ser muy costosa.

La excentricidad de la TP, el tamaño del agujero y la inclinación, la densidad del fluido de perforación, el tamaño de los recortes, la densidad de los recortes, la rotación de la TP, la velocidad de perforación, la reología del fluido de perforación y el gasto son los parámetros que influyen en el transporte de los recortes con grados diferentes. El uso práctico de estos parámetros para el control en el transporte de recortes depende mucho de su manejo en el campo.

En un intento de encontrar la combinación óptima de las propiedades reológicas del fluido de perforación y el gasto, varios estudios experimentales han sido dirigidos para investigar el proceso de erosión de la cama de recortes bajo diferentes propiedades reológicas del fluido de perforación y de gastos.

La altura de la cama de recortes fue investigada como una función del tiempo utilizando gastos variables y diferentes composiciones del fluido de perforación. Con base en esto se estableció una relación funcional entre las propiedades del fluido de perforación, gasto, altura de la cama de recortes y el tiempo requerido para limpiar el agujero.

Los cálculos secuenciales involucrados en determinar la combinación óptima de los parámetros "n" y "k" de la ley de potencias de la viscosidad, el tiempo de circulación y el gasto para minimizar la altura de la cama de recortes son proporcionados<sup>14</sup>.

La implementación en el campo de la optimización de las propiedades reológicas y del gasto puede ayudar en el mejoramiento de las prácticas de circulación antes del viaje y así reducir el riesgo asociado al tiempo no productivo.

**5.1 EL MODELO REOLOGICO DE LA LEY DE POTENCIAS CON PUNTO DE CEDENCIA (Herschel-Bulckey)**

El comportamiento de casi todos los fluido de perforación pueden ser simulados usando el modelo reologico de ley de potencias. Este puede ser reducido al modelo de Newton, plástico de Bingham o al de ley de potencias bajo ciertas consideraciones.

$$t = t_0 + Kg^n \dots\dots\dots(1)$$

La viscosidad de un fluido a un determinado esfuerzo puede ser calculado por:

$$m = \frac{t}{g} = (t_0 + Kg^n) / g \dots\dots\dots(2)$$

Como puede observarse en la ecuación 1 este modelo es más general que otros. Es decir, los modelos de Newton, Bingham y ley de potencias son soluciones particulares de este; pues si n es igual a la unidad y  $t_0$  es cero, el modelo se reduce a la ley de Newton (ecuación 3); en tanto que  $t_0$  es diferente de cero, este modelo representa al modelo Bingham (ecuación 4). Por otro lado, si n es diferente de la unidad y  $t_0$  es cero, resulta el modelo de ley de potencias (ecuación 5). Por este motivo, a este modelo se le ha denominado modelo de ley de potencias modificado<sup>16</sup>.

$$\left( t = \frac{m}{g_c} g \right) \dots\dots\dots(3)$$

$$t = \frac{n_p}{g_c} g + t_0 \dots\dots\dots(4)$$

$$t = Kg^n \dots\dots\dots(5)$$

Los parámetros reologicos n y k de un fluido de perforación son relacionados con la función inversa de la viscosidad,  $k$ .

El parámetro  $k$  esta definido por la ecuación 6 y es una aproximación de la viscosidad de un fluido en condiciones de prueba. No es una viscosidad real en el sentido que este valor pueda ser comparado con valores de la viscosidad. Sin embargo, un incremento en  $k$  representa un incremento en la viscosidad.

$$k = \frac{n}{K} \dots \dots \dots (6)$$

## 5.2 EFECTO DE LAS PROPIEDADES REOLOGICAS DEL FLUIDO DE PERFORACION Y DEL GASTO EN LA LIMPIEZA DEL AGUJERO

El problema de la optimización en la perforación, es formulado en este capítulo, el cual requiere encontrar los valores óptimos de los parámetros reológicos del fluido de perforación, en este caso, los parámetros del modelo de la ley de potencias  $n$ ,  $K$  y el gasto de tal forma que el tiempo de circulación sea mínimo.

El efecto del gasto sobre la velocidad de erosión es mostrado en la **figura 5.1**. Los datos son proporcionados para el caso donde la inclinación del agujero es de  $87^\circ$  y es utilizado un fluido de perforación base agua. En una prueba típica de erosión de la cama, la altura disminuye de manera exponencial hasta un cierto nivel de cama residual (o puede irse hasta cero dependiendo de las propiedades del fluido de perforación y el gasto) y se estabiliza en ese valor. Se puede ver que en la figura 5.1 la erosión de la cama de recortes ocurre con una gran rapidez a medida que se incrementa el gasto del fluido de perforación.

La **figura 5.2** muestra las curvas de erosión de la cama obtenidas utilizando cuatro diferentes fluidos de perforación. Los resultados son establecidos para el caso donde la inclinación del agujero es  $90^\circ$  y el gasto es de 200 gpm. Además se observa que para un gasto de fluido establecido, la cama de recortes puede ser reducida a un nivel muy bajo a medida que la relación  $n/k$  aumenta.

La **figura 5.3** muestra el efecto de inclinación del agujero sobre la erosión de la cama de recortes en el caso de pozos de gran ángulo. Como se puede observar en la figura 5.3, la acumulación de recortes y por lo tanto el tiempo de circulación aumenta a medida que la inclinación del agujero se incrementa.

La **figura 5.4** muestra el efecto combinado del gasto y la relación  $n/k$  del fluido de perforación en el equilibrio en la altura de la cama. La relación  $n/k$  puede ser interpretada como una función inversa de la viscosidad del fluido de perforación. En otras palabras, una alta relación de  $n/k$  indica una baja viscosidad del fluido de perforación. Una combinación de grandes gastos y altas relaciones de  $n/k$  provee las condiciones óptimas para una limpieza eficiente del agujero.

También puede ser observado en la figura 5.4 que la combinación de la viscosidad muy alta representado por valores muy bajos de  $n/k$ , y grandes velocidades darán una buena limpieza del agujero. El uso de un fluido de perforación con viscosidad intermedia parece ser menos efectivo para todos los gastos.

Los casos de flujo turbulento son mostrados para los gastos más altos como se observa en la figura 5.4. Además, muestra los valores para una buena limpieza del

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

agujero para el caso de viscosidades bajas con  $n/K = 0.006$  para un gasto de bombeo mayor a 200 gpm.

La **figura 5.5** muestra el efecto combinado de la función inversa de la viscosidad, y el gasto sobre el tiempo de circulación necesario para limpiar la sección de prueba con  $87^\circ$  de inclinación. Inicialmente, la altura de la cama era 5 in. La figura indica que para todos los valores de viscosidad el tiempo para limpiar el agujero es reducido si el gasto de bombeo es incrementado.

Es evidente de la información mostrada en la figura 5.5 que los recortes pueden ser removidos totalmente con un fluido viscoso, entonces esta remoción será más rápida que si se utilizara un fluido menos viscoso. Esto puede ser prácticamente difícil en algunos casos, como la remoción rápida de recortes con un fluido de gran viscosidad puede generar una presión excesiva a la que es aceptable para la operación.

El gasto óptimo para la remoción de recortes es obtenido para fluidos de alta viscosidad como se muestra en la figura 5.5. Esto no es una contradicción para los resultados observados en la figura 5.4. La información observada en la figura 5.4 muestra el equilibrio en la altura de la cama de recortes obtenida para el flujo de fluidos con diferentes propiedades viscosas. Para poder retirar totalmente los recortes, puede ser requerido un gasto de bombeo mucho más grande. Es el esfuerzo en la pared, generado por el alto gasto que es más eficiente en controlar la operación de limpieza del agujero.

La **tabla 5.1** compara los resultados obtenidos de la información mostrada en las graficas anteriores bajo régimen laminar y turbulento, asumiendo que su comportamiento puede ser descrito por el modelo de la ley de potencias. Los resultados que se observan en la **tabla 5.1** indican que el flujo turbulento es más eficiente en la remoción de la cama de recortes que el flujo laminar. En el caso del flujo turbulento las fuerzas aplicadas sobre los recortes del flujo son más grandes que en el caso de flujo laminar. Por lo tanto, la remoción de recortes fue mejor de lo que se esperaba para el caso de flujo turbulento.

La **ecuación 7** representa una relación única entre la función (el tiempo de circulación) y las variables operacionales ( $n$ ,  $K$  y el gasto).

$$h(t) = a + be^{-g} \dots\dots\dots(7)$$

Aunque el tiempo de circulación estimado corresponde solamente a la longitud de la sección de prueba en estudio (90 ft), el modelo puede ser usado para determinar la combinación óptima de las propiedades del fluido de perforación y el gasto para minimizar el tiempo de circulación, para cualquier longitud del agujero horizontal dadas las condiciones de la geometría del espacio anular y el tipo de fluido de perforación. Debe ser observado que el tiempo de circulación se relaciona únicamente con la erosión de cama de recortes. El problema de

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

optimización es resuelto para este caso donde la sección de prueba es completamente limpiada de recortes (es decir, la altura de la cama de recortes,  $h$ , es igual a cero).

### 5.3 OPTIMIZACION DE LAS PROPIEDADES REOLOGICAS DEL FLUIDO DE PERFORACION Y DEL GASTO PARA UN TIEMPO MINIMO DE CIRCULACION

La aplicación práctica de la erosión de la cama de recortes para la selección óptima de las propiedades del fluido de perforación y el gasto son mostrados a continuación.

#### Datos de perforación

Diámetro del agujero: 8.0 in

Diámetro exterior de la TP: 4.5 in

Inclinación del pozo: 87°

Fluido de perforación base agua

$n=0.652$  y  $K= 61.2$  cp

Q: 250 gpm

ROP: 50 ft/hr

Altura inicial de la cama de recortes,  $h'(0) = 5in$  .

Nota: la altura de la cama de recortes,  $h'(0)$ , es determinada por las condiciones de perforación.

Dadas las condiciones anteriores, determinar la combinación óptima de las propiedades reológicas ( $n$ ,  $k$ ) y el gasto, de tal manera que el tiempo de circulación sea mínimo para remover completamente los recortes de la sección de prueba. El modelo de erosión de la cama esta representado por la ecuación (7):

**Caso I:** Incrementar el gasto hasta 400 gpm y circular el mismo fluido de perforación.

El gasto del fluido de perforación es un factor importante para la limpieza de pozos de gran ángulo. Los coeficientes necesitan ser calculados para determinar la curva de erosión de la cama de recortes de la cuál el tiempo de circulación puede ser determinado. Los resultados son presentados en la **tabla 5.2**.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

La ecuación que describe la curva de erosión en el Caso I es presentada a continuación:

$$h(t) = -0.445 + 5.405e^{-0.0007t}$$

En el caso I, 63 minutos de circulación se necesitaron para remover completamente los recortes de la sección de prueba.

**Caso II:** Circular 400 gpm del fluido de perforación, cuyas propiedades reológicas son optimizadas para asegurar el tiempo mínimo de circulación.

Las propiedades reológicas del fluido de perforación son optimizadas para suministrar una adecuada limpieza en el agujero de tal manera que el tiempo de circulación sea mínimo. Las propiedades reológicas optimizadas del fluido de perforación (es decir los parámetros de la ley de potencias) pueden ser obtenidas usando el modelo de erosión de la cama de recortes. Los resultados son presentados en la **tabla 5.2**.

La ecuación que describe la curva de erosión de la cama en el Caso II es presentada continuación:

$$h(t) = -0.412 + 5.371e^{-0.0033t}$$

En el Caso II, 13 minutos de tiempo de circulación se necesitaron para remover completamente la cama de recortes. Los valores óptimos de  $n$  y  $K$ , y los coeficientes de la curva de erosión de la cama para este caso son presentados en la **tabla 5.2**.

**Caso III:** circular el fluido de perforación optimizando las propiedades reológicas y el gasto para asegurar el tiempo mínimo de circulación.

Las propiedades reológicas del fluido de perforación y la velocidad de circulación son optimizadas para suministrar una adecuada limpieza del agujero de tal manera que el tiempo de circulación sea mínimo.

Las propiedades reológicas, el gasto y los coeficientes del modelo de erosión de la cama para el Caso III son mostrados en la **tabla 5.2**.

La ecuación que describe la curva de erosión de la cama en el Caso III es presentada a continuación:

$$h(t) = -0.638 + 5.598e^{-0.0044t}$$

En el Caso III, se necesitaron 8 minutos de circulación para remover completamente los recortes de la sección de prueba.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

Las curvas de erosión de la cama de recortes para el Caso I (practica convencional), Caso II (propiedades del fluido de perforación optimizadas) y Caso-III (propiedades del fluido de perforación y gasto optimizados) son comparados en la **figura 5.6**.

Al especificar las propiedades del fluido y el gasto para la limpieza óptima del agujero, se debe recordar que los factores que ayudan a la limpieza podrían tener un efecto perjudicial sobre otros procesos en el pozo. Las limitaciones en la optimización del problema pueden ser seleccionadas como la máxima densidad equivalente de circulación permisible, capacidad de bombeo, máximo gasto permisible y el costo de la operación.

Gasto Q[gpm]	Sistema del fluido de perforación	Índice del comportamiento de flujo n	Índice de consistencia del fluido K [cp]	Altura de la cama [in]		Régimen de flujo Laminar (L) Turbulento(T)
				87°	90°	
200	A	0.58	97	1.5	1.6	T
200	B	0.63	110	2.1	2.2	L
200	C	0.52	855	3.4	3.6	L
200	D	0.68	157	4.0	4.0	L
250	A	0.58	97	1.0	0.9	T
250	B	0.63	110	1.2	1.5	L
250	C	0.52	855	2.6	3.2	L
300	A	0.58	97	0.0	0.7	T
300	B	0.63	110	0.6	1.1	L
300	C	0.52	855	2.0	2.6	L
300	D	0.68	157	2.5	2.7	L
350	A	0.58	97	0.0	0.4	T
350	B	0.63	110	0.3	0.8	L
350	C	0.52	855	1.3	1.9	L
400	A	0.58	97	0.0	0.1	T
400	B	0.63	110	0.2	0.5	L
400	C	0.52	855	0.4	1.2	L
400	D	0.68	157	0.8	1.7	L/T

**Tabla 5.1- Resumen de la Información obtenida en la erosión de la cama de recortes**



## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

Variables de perforación		Caso I	Caso II	Caso III
Parámetros reológicos del fluido de perforación	Índice del comportamiento de flujo, $n$	0.65	0.5	0.5
	Índice de consistencia del fluido, $K$ [cp]	61.2	800	450
	Función inversa de la viscosidad, " $k$ "	0.0107	0.0006	0.0011
Gasto	$Q$ [gpm]	400	400	400
Coeficientes de regresión	$a$	-0.445	-0.412	-0.638
	$b$	5.405	5.372	5.598
	$\ell$	0.0007	0.0033	0.0044
Modelo de erosión de la cama	$h(t) = a + be^{-\ell t}$	$-0.445 + 5.504e^{-0.0007t}$	$-0.412 + 5.372e^{-0.0033t}$	$-0.638 + 5.598e^{-0.0044t}$
Tiempo de circulación	$T_{\min}$ (minutos)	63	13	8

Tabla 5.2-Tiempo de circulación

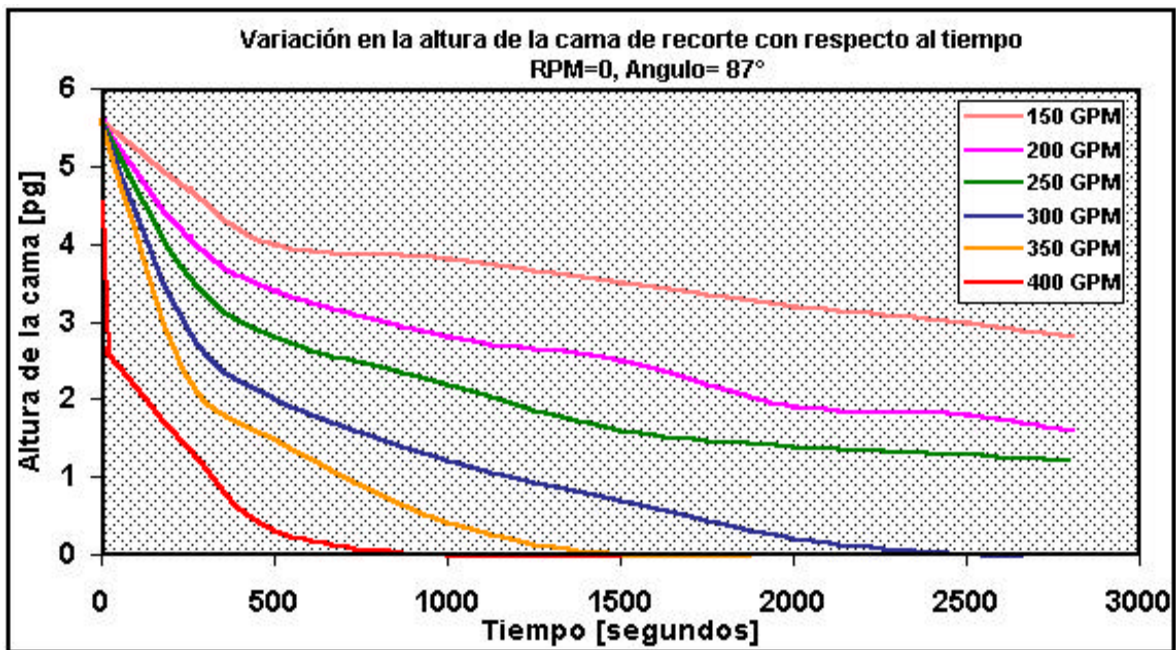


Figura 5.1- Curvas de erosión de la cama para gastos variables

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

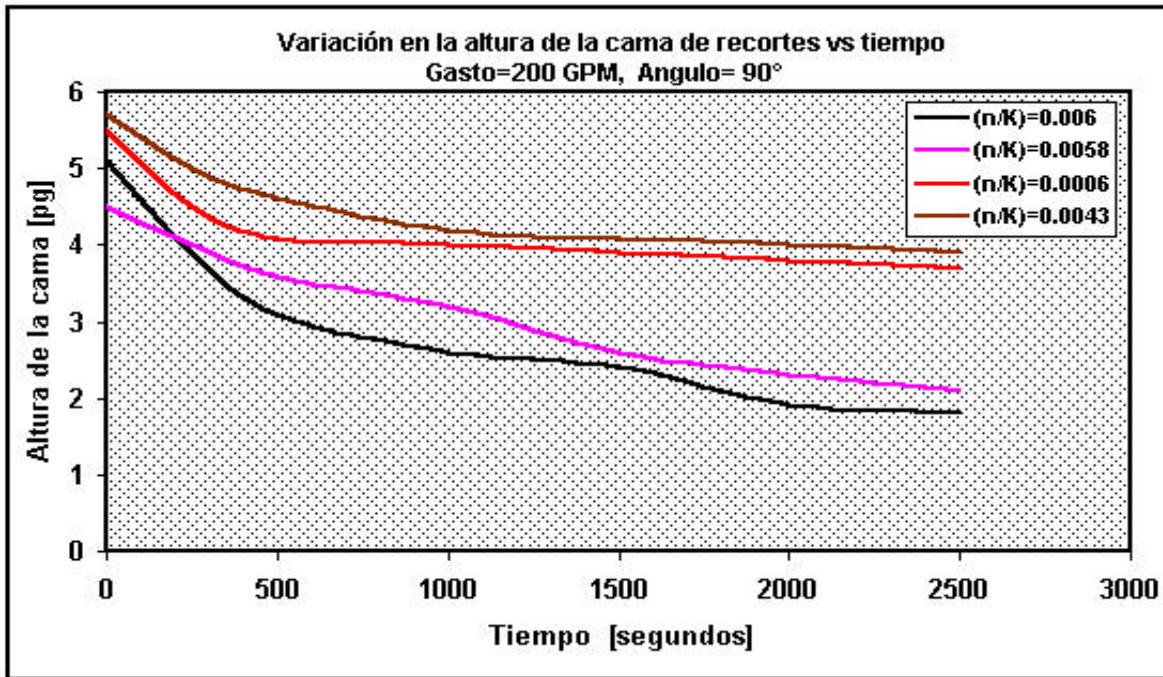


Figura 5.2- Curvas de erosión de la cama de recortes para diferentes reologías del fluido de perforación.

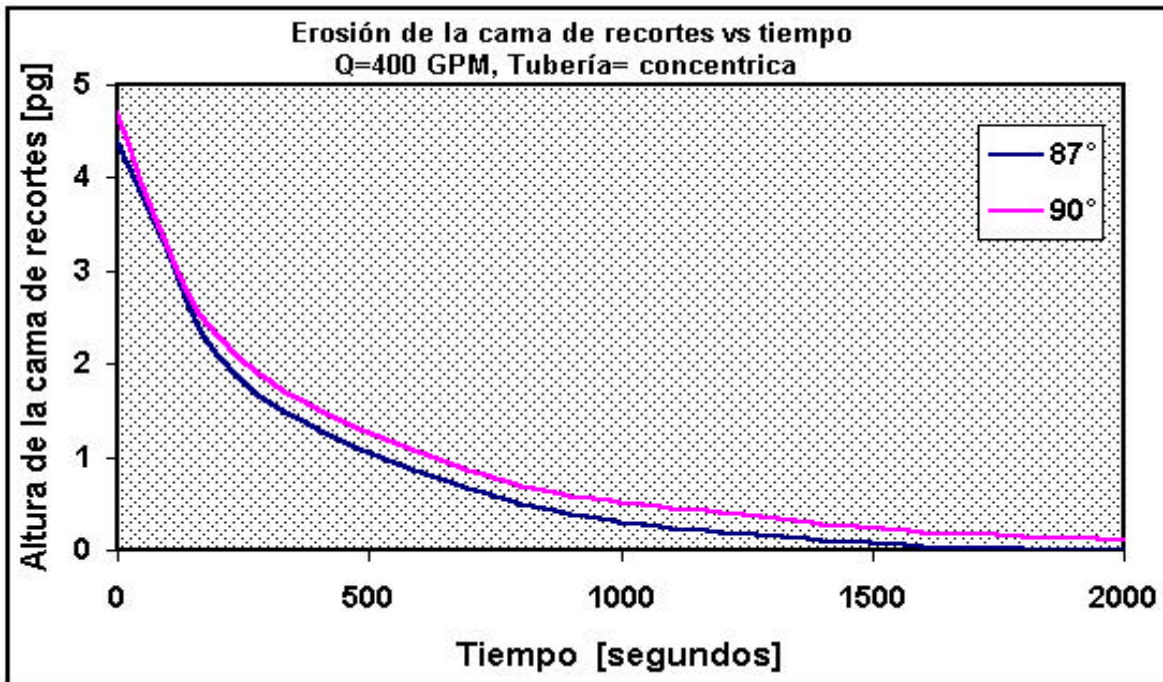


Figura 5.3- Efecto de inclinación del pozo sobre la erosión de la cama de recortes.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

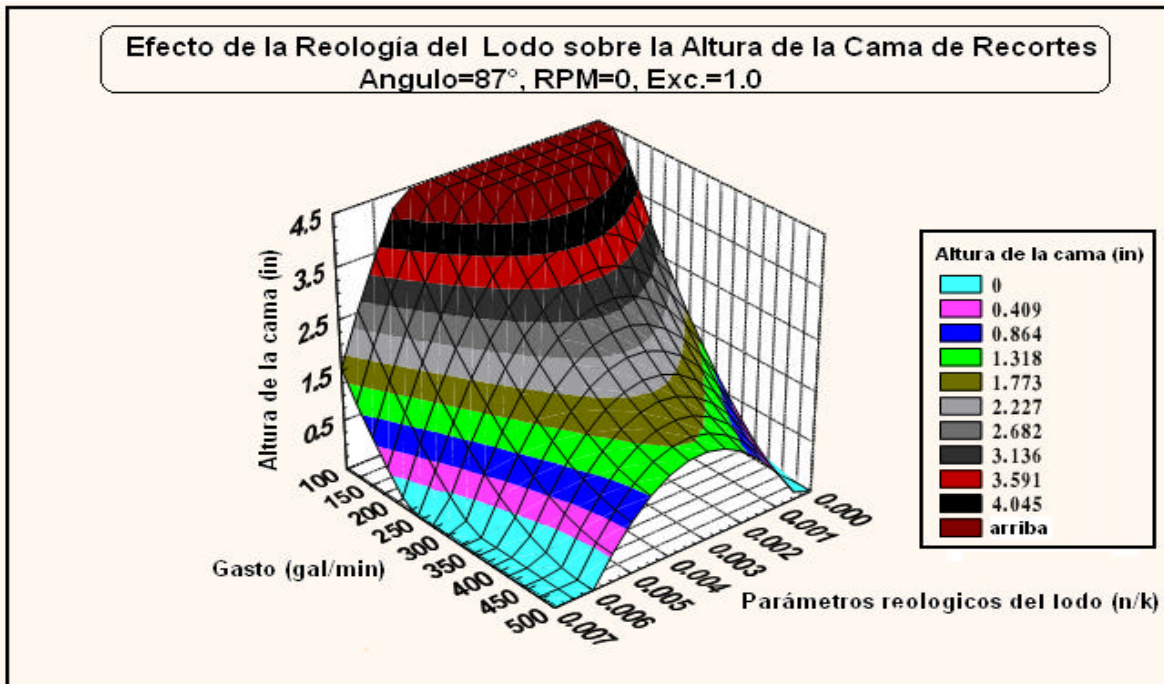


Figura 5.4- Efecto del gasto y las propiedades del fluido de perforación (n/K), sobre el equilibrio de la altura de la cama<sup>14</sup>.

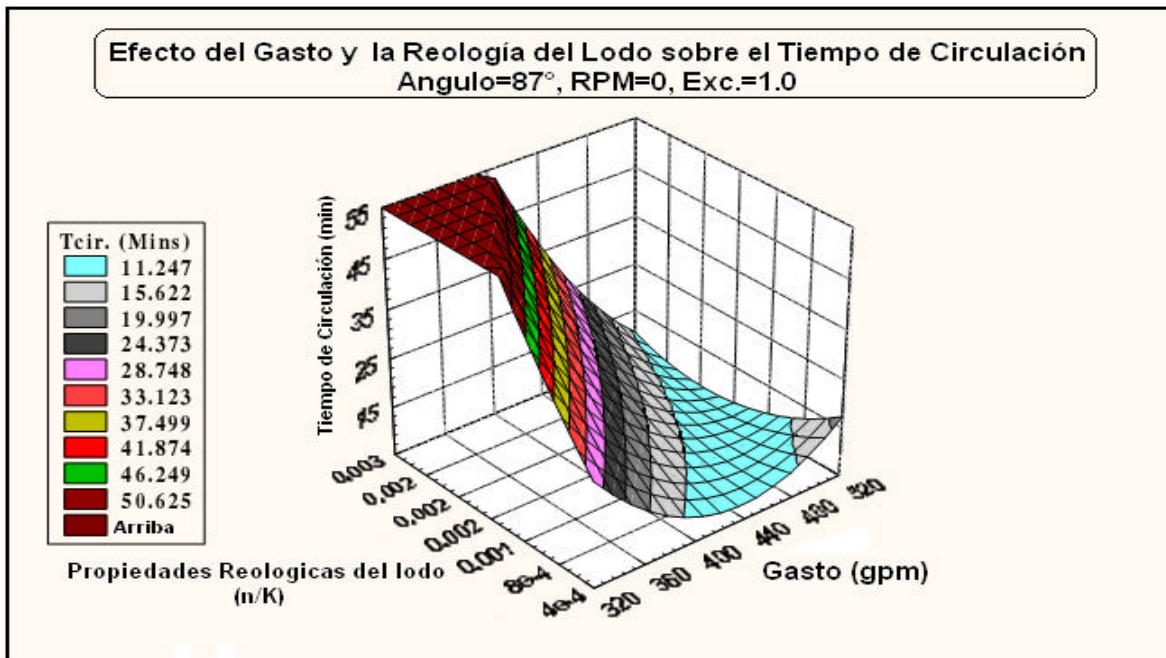


Figura 5.5- Tiempo de circulación como función del gasto y las propiedades del fluido de perforación (n/K)<sup>14</sup>.

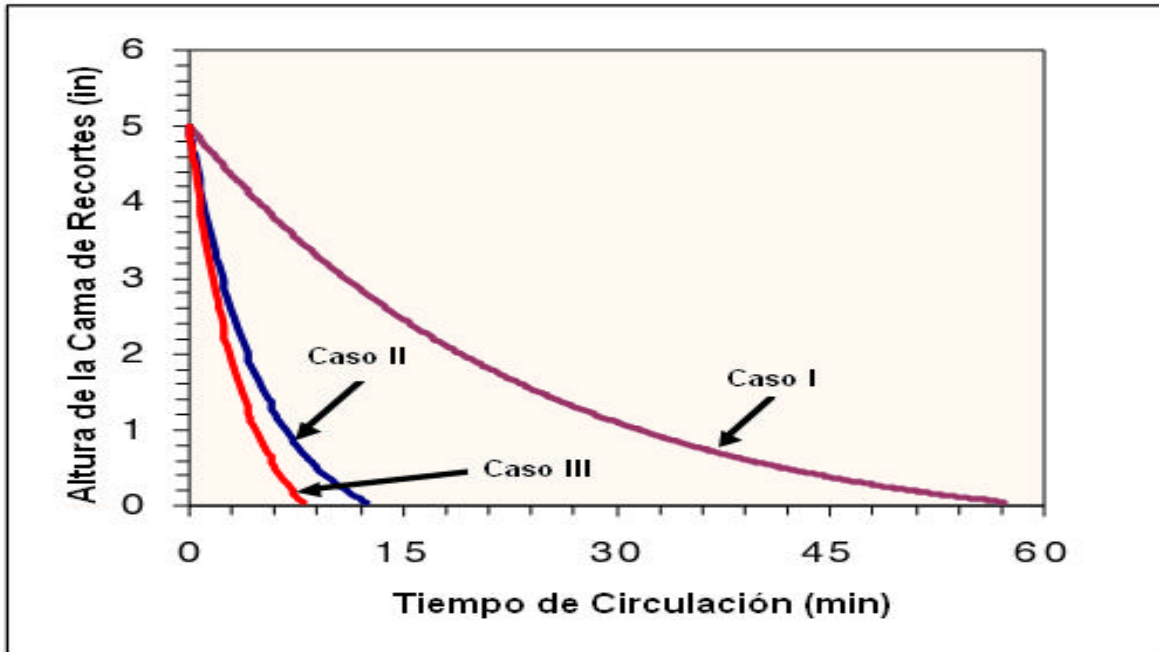


Figura 5.6- Curvas de erosión de la cama para el tiempo mínimo de circulación.

**NOMENCLATURA**

$t$  = Esfuerzo cortante ( $F/L^2$ ), ( $lb_f / ft^2$ )

$g$  = Velocidad de corte ( $1/T$ ), ( $1/seg$ )

$m$  = Viscosidad absoluta ( $M/LT$ ), ( $lb_m / seg - ft$ )

$g_c$  = Constante gravitacional ( $ML/FT^2$ ), ( $32.17 lb_m - ft / lb_f - seg^2$ )

$t_0$  = Esfuerzo de cedencia ( $F/L^2$ ), ( $lb_f / ft^2$ )

$n_p$  = Viscosidad plástica ( $M/LT$ ), ( $lb_m / seg - ft$ )

$n$  = Índice de comportamiento de flujo (adim)

$K$  = índice de consistencia ( $FT^n / L^2$ ), ( $lb_f - seg^n / ft^2$ )

ROP: Velocidad de penetración ( $ft/hr$ )

**CAPITULO 6**

**CONCLUSIONES**



## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

Existe una marcada diferencia entre el transporte de recortes en pozos horizontales y verticales. Se ha observado que las camas de recortes se forman en ángulos de inclinación mayores a 35° desde la vertical, y estas camas pueden deslizarse hacia abajo, para ángulos mayores a 50°. Las velocidades del lodo en el rango de 3 a 4 ft/seg son necesarias para la perforación de pozos de gran inclinación y horizontales, sin rotación de la tubería, comparadas con 1 o 2 ft/seg normalmente utilizadas para la perforación vertical. Al realizar el análisis de la información mostrada en este trabajo sobre los principales parámetros de perforación que afectan el transporte de recortes en pozos de gran inclinación y horizontales. Se ha concluido lo siguiente:

- El gasto es el parámetro más predominante en el transporte de recortes. Conforme se incrementa el gasto la acumulación de recortes se reduce.
- El tamaño de los recortes es otro factor importante en el transporte de recortes. Las partículas más pequeñas son mucho más difíciles para remover que los de tamaño medio y grande, ya que los recortes pequeños forman un mejor empacamiento.
- Los recortes más pequeños son más fáciles de transportar con lodos de gran viscosidad en comparación con los recortes de mayor tamaño; y llega a ser mucho más difícil cuando son menores a 0.5 mm.
- El ángulo del agujero tiene un efecto significativo sobre la  $V_{crit}$ . El incremento en el ángulo del pozo resulta en un aumento en la  $V_{crit}$  del lodo. La acumulación de recortes en el pozo y por lo tanto el tiempo de circulación requerido para limpiar el agujero de los recortes se incrementa conforme la inclinación del agujero aumenta.
- Si todos los parámetros se mantienen constantes, y el índice de comportamiento disminuye ("n"), el desarrollo de la cama también disminuye. Una combinación de altos gastos, ya sea con grandes o bajos valores de la relación ("n/K"), proporcionan las condiciones óptimas para una eficiente limpieza del agujero.
- El incremento en la excentricidad causa la disminución en el área de la cama.
- La densidad del fluido y de los recortes tienen un efecto moderado en desarrollo de la cama.
- La velocidad de penetración casi no tiene efecto en el desarrollo de la cama.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

- La velocidad crítica ( $V_{crit}$ ) se encuentra en el rango de 3 a 4 ft/seg dependiendo del valor de los diferentes parámetros, tales como la reología del lodo, velocidad de perforación, excentricidad de la tubería, el gasto, entre otros.
- Los lodos bajo régimen de flujo turbulento tienen un mejor desempeño que en flujo laminar, ya que la remoción de recortes es más fácil con flujo turbulento.
- La velocidad requerida para iniciar el rodamiento de los recortes, es menor que la requerida para iniciar la suspensión de los recortes.
- El efecto de la rotación de la tubería sobre la  $V_{crit}$  cuando se está utilizando un fluido de baja viscosidad, es insignificante. La  $V_{crit}$  para los mecanismos de transporte por rodamiento y suspensión, fue reducido significativamente cuando la tubería fue rotada mientras se circulaba un fluido de viscosidad media o alta.
- La  $V_{crit}$  requerida para iniciar el transporte de recortes para ambos mecanismos, por rodamiento o suspensión, son sensibles a las variaciones del ángulo del pozo.
- Un incremento en la viscosidad del fluido de circulación disminuye la  $V_{crit}$  para ambos mecanismos (rodamiento y suspensión), cuando se está usando fluidos de viscosidad baja y alta.
- Un fluido de baja viscosidad en flujo turbulento, puede ser un mecanismo de transporte muy efectivo. En general, las diferencias entre la  $V_{crit}$  para los recortes por rodamiento y en suspensión para el fluido de baja viscosidad, fue mayor que la correspondiente diferencia para los fluidos de viscosidad media y alta.
- Al incrementar la viscosidad del fluido, no necesariamente resulta en una disminución de la  $V_{crit}$ .
- El fluido de baja viscosidad resultó ser el de mejor desempeño en la limpieza del agujero, por el mecanismo de rodamiento. El siguiente mejor, fue el de alta viscosidad y el menos efectivo es el de viscosidad media. Sin embargo, el mejor fluido para una efectiva limpieza del agujero por suspensión de los recortes es el de mayor viscosidad, seguido por el de baja y al igual que en el caso anterior, el que proporciona menor efectividad es el de viscosidad media.

# TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

## BIBLIOGRAFIA

1. Joshi,S.D.:”Horizontal Well Technology”, Tulsa, OK, USA, Penn Well Books, 1991.
2. Marco Antonio Martínez Castañeda , “Selección de la Trayectoria de un Pozo Horizontal”, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, Septiembre 1998.
3. AIPM, Revista “Ingeniería Petrolera”,Vol. XXXVII No. 4, Abril 1997
4. Luis Armando Montes De Oca Rúelas, “Tendencias Tecnológicas en la Perforación de pozos”, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México 2003.
5. Aguilar Mejía Daniel, “Perforación Horizontal en el Campo Rodador”, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, México 2005.
6. Castro Castro Rene/ “La perforación horizontal: una nueva alternativa en la explotación de hidrocarburos”/ Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, México 1991.
7. R. León-Ventura, G. Gonzáles y H Leyva-G/PEMEX- E & P, “Evaluación de la producción de pozos horizontales”, SPE , México, Febrero del 2000
8. Franck J. Schuh, Drilling Technology, Inc, “Horizontal Well Planning-Build Curve Design”, SPE **890008**, Octubre de 1989.
9. Franck J. Schuh, “Horizontal well technology”, Manual Del Curso De Perforación Horizontal”, OTC 4791, 1990.
10. Patrick Kenny and Egil Sunde, Statoil A/S, and Terry liemphill, Baroid Drilling Fluids, “Hole Cleaning Modelling: What’s ‘n’ Got To



## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

- Do With It?.", SPE **35099**, 1996.
11. M. Evren Ozbayoglu/ Middle East Technical University, Stefan Z. Miska, Troy Reed, Nicholas Takach/ The University of Tulsa/"Analisis of the effects of major drillig parameters on cuttings transport efficienci for high angle well in coiled tubing drilling operations"/ SPE **89334**/ 2004
  12. L. Zhou, Scandpower Petroleum Technology Inc./ "Hole Cleaning During UBD in Horizontal and Inclined Wellbore"/ SPE- **98926**/ 2006
  13. Bourgoyne, A.T., "Applied Drilling Engineering", SPE texbook series, Vol. 2, 1986
  14. Rishi\_B. Adari, Stefan Miska and Ergun Kuru, University of Tuzla, Meter Bern, BP-Amoco, Arild Saasen, SPE, Statoil/ "Selecting Drilling Properties and Flow Rates for Effective Hole Cleaning in High-Angle and Horizontal Wells"/ 2000 / SPE **63050**
  15. R. Alfredo Sanchez, J.J. Azar, A.A. Bassal, A.L. Martins /"effect of drillpipe rotation on hole clearing during directional-well drilling"/ SPE **56406** / 1999.
  16. M. en C. Juan Gilberto Leon Loya/ "Reologia de los fluidos de perforación y reparación de pozos"/ IPN
  17. A.A. Pilehvari, Texas A&M U. at Kingsville, and J.J. Azar, SPE, and S.A. Shirazi, "State-of-the-Art Cuttings Transport in Horizontal Wellbores", SPE **57716**, U. de Tulsa
  18. Reyez Reza Placido Gerardo, "Fundamentos para desarrollar la Perforacion horizontal", Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, México 1987.

## TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS HORIZONTALES

19. Larsen, T.I., Pilehvari, A.A., and Azar, J.J.: "Development of a New Cuttings Transport Model for High-Angle Wellbores Including Horizontal wells", SPE **25872**
20. A.M. Kamp, SPE, M. Rivero, SPE, PDVSA Intevep/ "Layer Modeling for Cuttings Transport in Highly Inclined Wellbores"/ SPE **53942**/ Abril 1999
21. R.K. Clarck, SPE, Shell Development Co., and K.L Bickham, BET Development Co./ "A Mechanistic Model for Cuttings Transport"/ SPE **28306**/ 1994.
22. J.T. Ford, J.M. Peden, M.B. Oyenehin, Erthur Gao y R. Zarrough / "Experimental Investigation of Drilled Cuttings Transport in Inclined Boreholes"/ SPE **20421** /1990
23. Rudi Rubiandini R. S."/ "Equation for Estimating Mud Minimum Rate for Cuttings Transport in an Inclined until Horizontal Well"/ **SPE 57541**, 1999