



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA EN EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN DE RECURSOS NATURALES –  
PERFORACIÓN

MODELO HIDRAULICO PARA EL TRANSPORTE DE SÓLIDOS EN POZOS ALTAMENTE  
DESVIADOS

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
IVÁN LEONARDO OROZCO CASTILLO

TUTOR PRINCIPAL:  
DR. JOSÉ MITRE SILVA  
INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO

MÉXICO, D. F.

2014

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: M. en C. Ortiz Ramírez Jaime

Secretario: Dr. Luna Rojero Erick Emanuel

Vocal: Dr. Mitre Silva José

1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. Velasco Hernández Jorge X.

2<sup>do</sup>. Suplente: M. en I. Escobar Castillo Javier

Lugar donde se realizó la tesis: México, D.F.

**TUTOR DE TESIS:**

DR. JOSÉ MITRE SILVA

-----  
**FIRMA**

## Introducción

Los pozos direccionales y altamente desviados son en la actualidad un recurso de gran importancia en la industria petrolera. El desarrollo de este tipo de pozos son un reto tecnológico y económico a corto plazo, sin embargo, su implementación ha permitido incrementar la producción de hidrocarburos en los campos alrededor del mundo debido a la forma en que estos pozos llegan y hacen contacto con el yacimiento, por lo que se vuelven totalmente rentables a mediano y largo plazo [1,2].

En la perforación de pozos altamente inclinados, es necesario tener en cuenta consideraciones especiales en comparación a los pozos verticales, por lo tanto, se debe monitorear parámetros críticos como; la limpieza del agujero, esfuerzos sobre la sarta de perforación, estabilidad del agujero, brotes y logística. Sin embargo, el parámetro crítico clave es la limpieza del agujero ya que afecta directamente a los demás parámetros mencionados [3].

Una mala limpieza de un pozo altamente desviado causa una acumulación de sólidos en forma de cama en la pared inferior del espacio anular y cuando ésta llega a tener un espesor considerable, provoca mayores esfuerzos de arrastre y torsión sobre la sarta de perforación, también reduce el área de circulación del fluido ocasionando un aumento en la presión en el pozo y dificulta la obtención de datos de las herramientas de registros de pozos [3]. Por lo tanto, la acumulación excesiva de sólidos en el pozo puede desencadenar una serie de problemas graves, que si no es atendida adecuadamente, puede generar costos extras de perforación o incluso el fracaso del mismo.

Los modelos para el transporte de sólidos en pozos verticales no son aplicables a los pozos altamente desviados, ya que los sólidos no se transportan de igual manera en ambos casos. En los pozos verticales, los sólidos no se asientan en las paredes, mientras que en los altamente desviados, se forma una cama de sólidos estacionaria que ocupa cierta área transversal del mismo [4]. Los modelos actuales para predecir la altura de la cama de sólidos siguen en constante estudio e innovación, sin que exista en la actualidad un modelo de uso extendido en la perforación de pozos altamente desviados [3]. En el presente trabajo de investigación, se estudia y desarrolla un modelo para predecir el espesor de la cama de sólidos que se forma a altas inclinaciones del pozo,  $60^\circ$  a  $90^\circ$ , rango donde se ha observado experimentalmente se forma una cama de sólidos estacionaria espesa. Además, el modelo es sensible a diferentes parámetros de campo como; propiedades físicas del fluido de perforación y del sólido transportado, geometría del pozo, y otros parámetros operativos como la velocidad de penetración de la barrena, rotación y excentricidad de la sarta de perforación.

## Resumen

Debido a la gran importancia que tiene el transporte de los sólidos generados por la barrena en la perforación de pozos direccionales y altamente desviados para que éste sea desarrollado con la menor problemática posible, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo el desarrollo de un modelo para predecir la altura de la cama de sólidos generados a altos grados de inclinación del pozo,  $60^\circ$  a  $90^\circ$ .

En el capítulo uno, se introducen los conceptos básicos que describen a los pozos direccionales y altamente desviados, se analizan los tipos, aplicaciones y consideraciones especiales que conllevan su desarrollo, con el objetivo de que se comprenda de forma general la importancia actual de los pozos direccionales y altamente desviados y la criticidad de estudiar la limpieza del agujero en las operaciones de perforación de este tipo de pozos.

En el capítulo dos, se particulariza en el tema de la limpieza del agujero en pozos direccionales y altamente desviados, donde se analizan los resultados de los estudios experimentales llevados a cabo por Tomren et al [4] y Ford et al [5], con el objetivo de comprender el fenómeno de transporte de sólidos en pozos direccionales y altamente desviados. En este capítulo se analizan los principales parámetros que afectan al espesor de la cama de sólidos acumulados en el espacio anular tales como; ángulo de inclinación, velocidad promedio del flujo anular, régimen de flujo, excentricidad y rotación de la sarta de perforación. El objetivo es comprender como afectan los parámetros anteriores a la generación o erosión de la cama de recortes y tener puntos de comparación para comprobar el desempeño del modelo desarrollado.

En el capítulo tres, se estudia el mecanismo de transporte de los sólidos sumergidos en un flujo de fluidos. Se analiza la velocidad terminal de asentamiento de la partícula o velocidad de resbamiento, la cual describe la velocidad a la que una partícula cae sin aceleración en un fluido estático, dicho parámetro, describe parte del fenómeno de dispersión de los sólidos en el medio en que se transportan [6]. Posteriormente, se estudia la velocidad mínima a la que una partícula esférica en reposo sobre una cama de partículas idénticas se empieza a deslizar, esta velocidad se emplea para predecir la velocidad mínima a la que una cama de sólidos móvil se mueve [7]. Y por último, se analiza la dispersión de las partículas sólidas en el medio que los transporta a partir de la ecuación de difusión y advección [6].

En el capítulo cuatro, se desarrolla el modelo hidráulico para la predicción del espesor de la cama de sólidos acumulados en el espacio anular de pozos altamente desviados. En este capítulo, se comienza analizando el modelo geométrico que describe el patrón de flujo de dos capas; una capa de flujo de sólidos en suspensión y otra capa que comprende la cama estacionaria de sólidos [8]. También se desarrolla el modelo geométrico para modelo de tres capas; una capa de flujo de sólidos en suspensión, otra capa delgada de sólidos estrechamente compactados en movimiento y una tercera capa de cama de sólidos estacionaria [7]. El objetivo del modelo geométrico es obtener las áreas y perímetros de cada una de las capas en función de los espesores de las mismas.

Posteriormente, se realiza el balance de masa y fuerza para el flujo de sólidos y líquido para el modelo de dos y tres capas, con el objetivo de obtener las ecuaciones fundamentales que describen el modelo en desarrollo. Por otro lado, la dispersión de los sólidos en el fluido que circula en el espacio anular es descrita por la solución de la ecuación de difusión y advección y su integración sobre el área de la capa de flujo de sólidos en suspensión, con el objetivo de obtener la concentración promedio de sólidos que circulan en esta capa [7, 8, 9]. Para el modelo de tres capas, se desarrolla una ecuación para obtener la velocidad mínima a la que se desliza la cama de sólidos por encima de la cama de recortes estacionaria y por debajo de la cama de flujo de sólidos en suspensión. Y por último, se simplifican las ecuaciones de balance de masa y fuerza y se desarrolla la solución del sistema de ecuaciones para obtener el espesor de la cama de sólidos estacionaria para el modelo de dos y tres capas.

Mediante la solución del sistema de ecuaciones desarrollado en el capítulo cuatro, en el capítulo cinco, se validan los resultados obtenidos del espesor de la cama de sólidos estacionaria del modelo con los estudios experimentales [4] en función del ángulo de inclinación del pozo, velocidad promedio y viscosidad del fluido. Posteriormente se obtienen y se discuten los resultados obtenidos del espesor de la cama de sólidos estacionaria del modelo en función de parámetros de campo en las operaciones de perforación de pozos altamente desviados tales como; geometría del pozo, propiedades físicas del fluido de perforación y de los recortes, velocidad de penetración de la barrena, velocidad de rotación y excentricidad de la sarta de perforación.

Por último, en el capítulo seis, se concluye el tema generalizando los resultados obtenidos y el alcance que estos tienen para las operaciones de perforación de pozos altamente desviados. También se hace mención del trabajo necesario a futuro para seguir innovando el modelo y pueda ser aplicado con mayor amplitud en el área de perforación de pozos no convencionales.

## ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| <b>1. POZOS DIRECCIONALES Y ALTAMENTE DESVIADOS</b>                         |    |
| 1.1 Términos básicos  | 5  |
| 1.2 Tipos de los pozos  | 5  |
| 1.3 Aplicaciones  | 10 |
| 1.4 Consideraciones especiales  | 17 |
| <b>2. LIMPIEZA DEL AGUJERO EN POZOS DIRECCIONALES Y ALTAMENTE DESVIADOS</b> |    |
| 2.1 Patrones de Flujo   | 21 |
| 2.2 Parámetros críticos   | 22 |
| 2.2.1 Ángulo de inclinación del pozo  | 22 |
| 2.2.2 Velocidad de flujo  | 27 |
| 2.2.3 Régimen y viscosidad del flujo  | 27 |
| 2.2.4 Excentricidad de la sarta de perforación                              | 28 |
| 2.2.5 Rotación de la sarta de perforación                                   | 29 |
| <b>3. MECANISMO DE TRANSPORTE DE LOS SÓLIDOS</b>                            |    |
| 3.1 Asentamiento  | 31 |
| 3.2 Rodamiento  | 35 |
| 3.3 Dispersión  | 37 |
| <b>4. DESARROLLO DEL MODELO</b>   |    |
| 4.1 Ecuaciones de la geometría  | 39 |
| 4.2 Ecuaciones del balance de masa y fuerza                                 | 44 |
| 4.3 Ecuaciones de concentración promedio en la capa de flujo en suspensión  | 51 |
| 4.4 Ecuación de velocidad mínima de la cama de sólidos móvil                | 53 |
| 4.5 Solución  | 55 |
| <b>5. VALIDACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS</b>                          |    |
| 5.1 Validación  | 60 |
| 5.2 Discusión   | 68 |
| <b>6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO</b>                                  |    |
| 6.1 Conclusiones  | 81 |
| 6.2 Trabajos a futuro   | 83 |
| <b>NOMENCLATURA, APENDICES Y REFERENCIAS</b>                                | 84 |

# **CAPÍTULO 1**

## **1. POZOS DIRECCIONALES Y ALTAMENTE DESVIADOS**

La perforación direccional y altamente desviada es la ciencia de desviar un pozo a lo largo de una trayectoria planeada hacia un objetivo localizado a una distancia lateral horizontal y una profundidad vertical [10].

La perforación direccional y altamente desviada evolucionó de la necesidad de perforar pozos en direcciones diferentes de la vertical, por lo que es necesario el uso de procedimientos y herramientas especiales para cambiar la dirección desde la vertical hacia la horizontal, con el fin de penetrar objetivos que no pueden ser alcanzados por los métodos de perforación vertical. Este tipo de perforación ha sido utilizada principalmente en la exploración de pozos y empleada para producir yacimientos a mayor ritmo de producción [10].

Existen varios perfiles geométricos de pozos clasificados como direccionales y altamente desviados que son función de parámetros como la inclinación, desplazamiento horizontal y secciones de curvas construidas. Las operaciones de perforación para desarrollar este tipo de perfiles son de alto riesgo a diferencia de la perforación convencional vertical, por lo que se deben realizar programas de perforación eficientes y eficaces que tomen en cuenta las consideraciones especiales necesarias para minimizar los problemas sobre la trayectoria del pozo, asentamientos de tuberías de revestimiento y estabilidad del agujero [11].

### **1.1 TÉRMINOS BÁSICOS**

En el desarrollo de pozos direccionales y altamente desviados se tienen los siguientes términos que describen el perfil geométrico del pozo, ver figura 1.1.1.

- **Profundidad vertical verdadera (PVR).** Distancia vertical desde el nivel de referencia (Mesa rotaria, Buje Kelly o piso de perforación) hasta un punto dado en la trayectoria del pozo.
- **Kick Off Point (KOP).** Es el punto en el que se inicia la desviación del pozo.
- **Profundidad desarrollada (PD).** Es la distancia medida a lo largo de la trayectoria del pozo desde el punto de partida de referencia en superficie hasta un punto dado.
- **Inclinación del pozo.** Es el ángulo que se forma a partir de la vertical y la sección desviada del pozo.
- **Sección construida (Build Section) o curva construida (Build Curve).** Es toda la trayectoria curva, es decir, desde el KOP hasta el EOB.
- **Fin de la construcción (End of Build-EOB).** Es el punto en donde la inclinación del pozo ha terminado de incrementar. Esta sección también es conocida como Fin de la Curva (End of Curve – EOC).

- **Sección Tangente.** En esta sección, la inclinación del pozo se mantiene constante desde el EOB hasta el objetivo o hasta la segunda sección de curva.
- **Sección de caída.** Es el punto en donde la inclinación del pozo es reducida.
- **Desplazamiento horizontal (DH).** Es la distancia total y lineal en el plano horizontal desde la tubería conductora hasta el objetivo mismo.

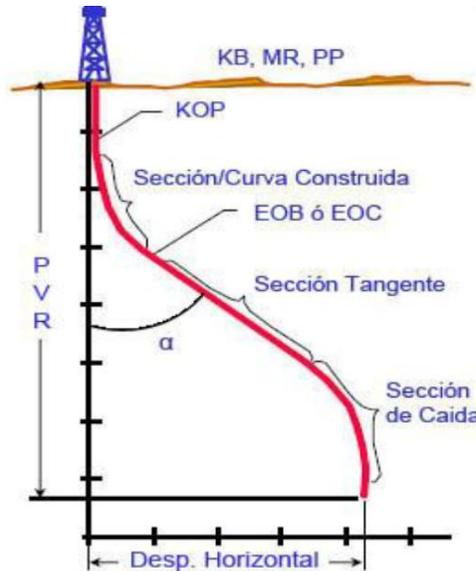


Fig. 1.1.1 Perfil de un pozo direccional y sus características principales [12].

## 1.2 TIPOS DE POZOS

Existen básicamente cuatro tipos de pozos direccionales:

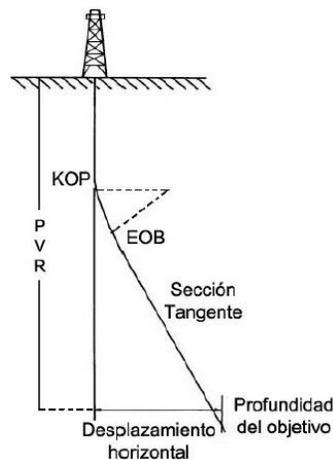


Fig. 1.2.1 Perfil de pozo tipo I [12].

- **Pozos tipo I.** Denominados tipo “J”, son perforados verticalmente desde la superficie hasta el punto denominado KOP (Kick Off Point), son desviados a profundidades someras y a partir de este punto el pozo es desviado hasta alcanzar un ángulo máximo y la dirección deseada. Una vez terminada la zona de construcción (EOB), el ángulo y la dirección son mantenidos mientras se perfora

hacia el objetivo de forma tangente. Este tipo de pozos son perforados generalmente donde se encuentra una sola zona productora.

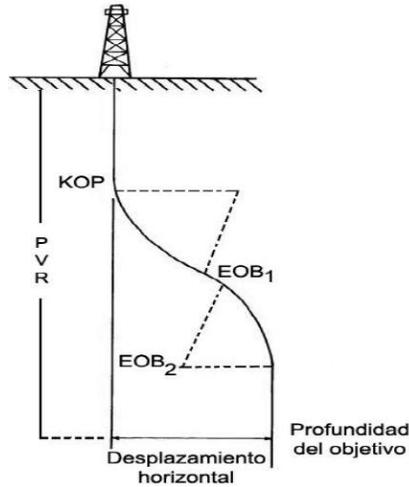


Fig. 1.2.2 Perfil de pozo tipo II [12].

- **Pozo tipo II.** Denominados tipo “S” y de forma parecida al tipo I, son desviados a profundidades someras y la tubería de revestimiento, TR, es corrida a través de la primera curva construida. El ángulo y la dirección son mantenidos hasta alcanzar el desplazamiento horizontal requerido, entonces, el ángulo es disminuido hasta alcanzar la vertical. Este tipo de pozo es generalmente usado donde se encuentran varias zonas productoras.

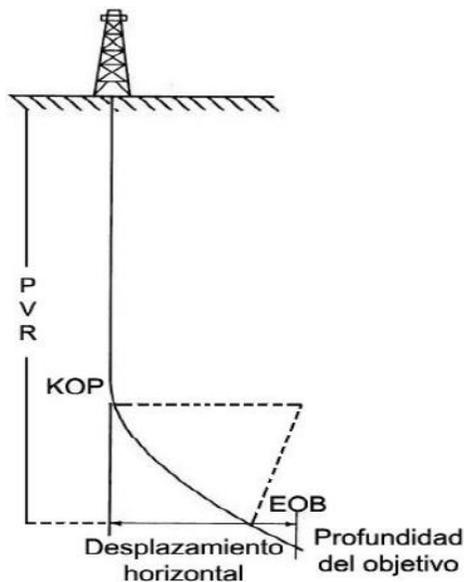


Fig. 1.2.3 Perfil de pozo tipo III [12].

- **Pozos tipo III.** A diferencia del pozo tipo I y II, el KOP se encuentra a una profundidad mayor y la TR superficial es asentada antes de la desviación. Las inclinaciones son altas y la desviación horizontal baja. Este tipo de pozos son

generalmente usados cuando se presentan domos salinos, fallas geológicas y también en pruebas estratigráficas.

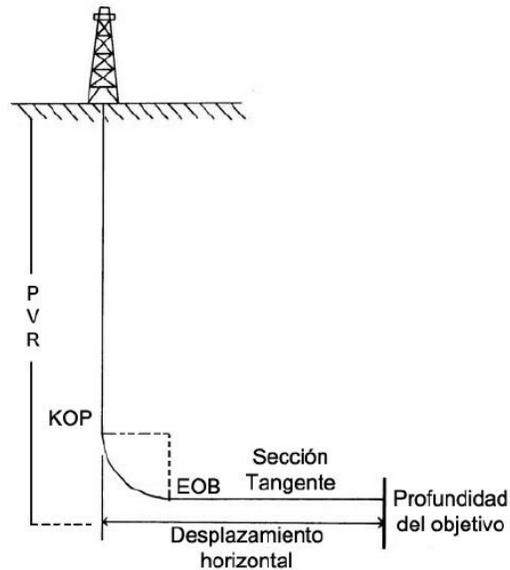


Fig. 1.2.4 Perfil de pozo tipo IV [12].

- **Pozos tipo IV.** Catalogados como horizontales o de alcance extendido, el diseño puede ser variado, sin embargo, tendrán inclinaciones mayores a  $80^\circ$  y secciones horizontales extensas. Son usados para alcanzar objetivos a grandes distancias y para tener una mayor área de contacto con la zona productora, incrementando su producción.
  - **Pozos horizontales.** Se clasifican según su radio de curvatura a la horizontal [12]:
    - **Corto.** Tienen un radio de giro cerca de 60 ft y un ángulo de construcción muy alto, algunos agujeros horizontales pueden ser perforados desde el mismo pozo y la longitud promedio máxima de las laterales es cerca de 300 a 700 ft en casos óptimos, pero generalmente son considerablemente más cortos.
    - **Radio mediano.** Tienen un radio de giro de 300 a 800 ft correspondiente a ángulos de construcción entre  $19.1^\circ$  a  $7.1^\circ$  cada 100 ft de profundidad desarrollada. Las laterales horizontales en promedio son de 1,500 a 3,000 ft de longitud con penetraciones máximas de 4,000 ft.
    - **Radio largo.** Tienen un radio de giro de 1,000 a 3,000 ft que corresponden a un ángulo de construcción de  $5.7^\circ$  a  $1.2^\circ$  cada 100 ft de profundidad desarrollada. Las laterales horizontales en promedio tienen una longitud de 2,000 ft a 5,000 ft con penetraciones máximas de 5,700 ft.
  - **Los pozos de alcance extendido (ERW).** Son desviados de su vertical y su sección construida e inclinación son desarrolladas para tener un mayor desplazamiento horizontal y alcanzar un objetivo a una cierta distancia de

la superficie. Se emplean grandes radios de curvatura de 2° a 6° por cada 100 ft perforados.

Se considera ERW cuando la relación de desplazamiento horizontal, DH, respecto a la profundidad vertical real, PVR, es igual o mayor a dos, ver ecuación 1.2.1.

$$\frac{DH}{PVR} \geq 2$$

Ec.1.2.1

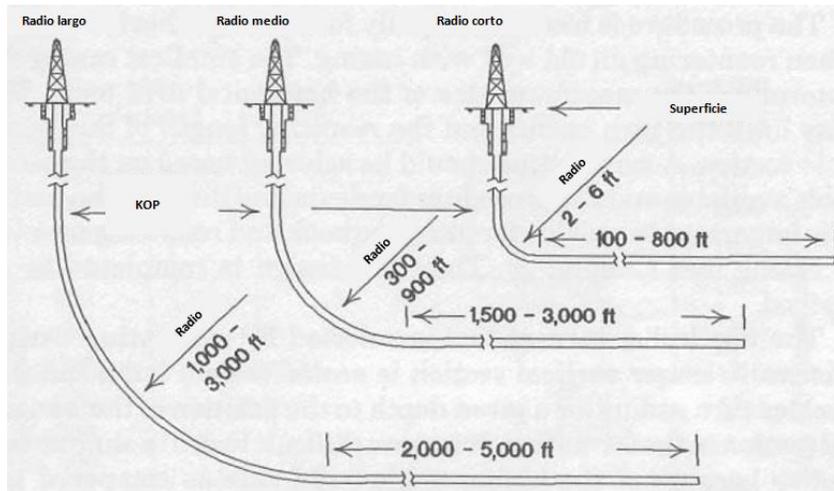


Fig. 1.2.5 Tipo de diseños de pozos horizontales [11].

Por otro lado se cree que ésta no es una definición aplicable para trayectorias complejas en donde la relación PD/PVR sería más significativa. En figura 1.2.6. Se observa que la trayectoria compleja tiene una relación DH/PVR menor que la convencional por lo que no describe adecuadamente su desplazamiento horizontal.

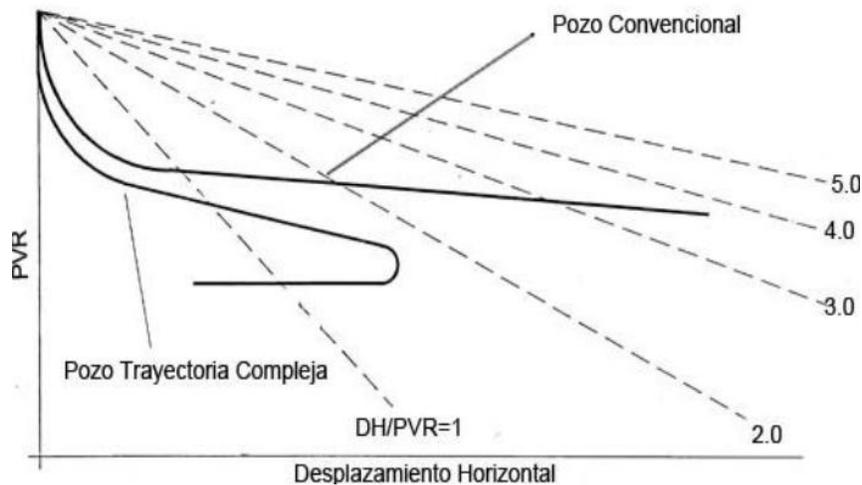


Fig. 1.2.6 Definición DH/PVR vs PD/PVR [12].

Por otro lado, los pozos de alcance extendido se clasifican en:

- **Relación DH/PVR.** Cuando el valor de la relación DH/PVR es igual o mayor a dos y menor que tres son denominados de alcance extendido, cuando es mayor de tres y menos que cinco son denominados de mega alcance extendido y de ultra alcance extendido cuando es mayor que cinco.

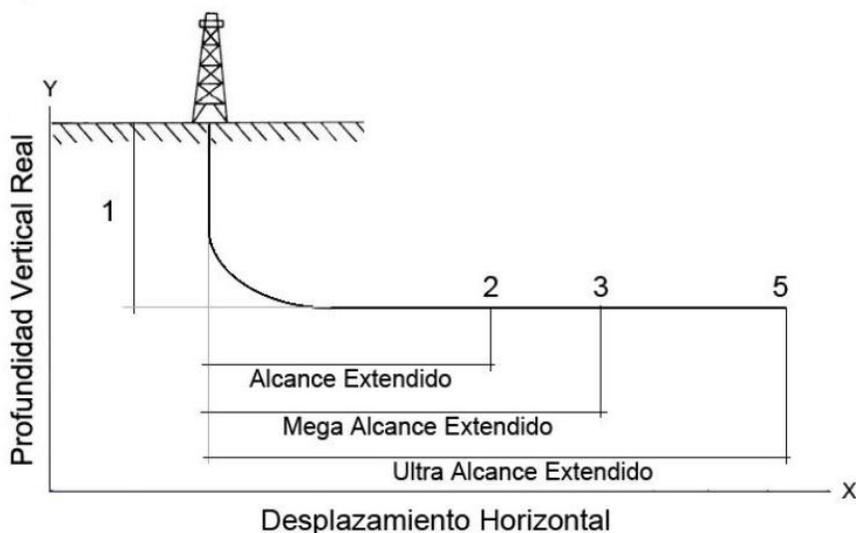


Fig. 1.2.7 Clasificación relación DH/PVR [12].

- **Profundidad vertical real.** Las compañías operadoras líderes en el ramo de ERW como British Petroleum o Exxon Mobil, clasifican a estos pozos de acuerdo al PVR.

| Nivel de profundidad | Profundidad vertical real [m] | Record actual desplazamiento horizontal [m] | Relación (DH/PVR) |
|----------------------|-------------------------------|---|-------------------|
| Somero               | 1,250                         | 10,900                                      | 8.72              |
| Intermedio           | 3,048                         | 8,000                                       | 2.62              |
| Profundo             | 4,573                         | 7,000                                       | 1.53              |

Tabla 1.2.1 Clasificación PVR

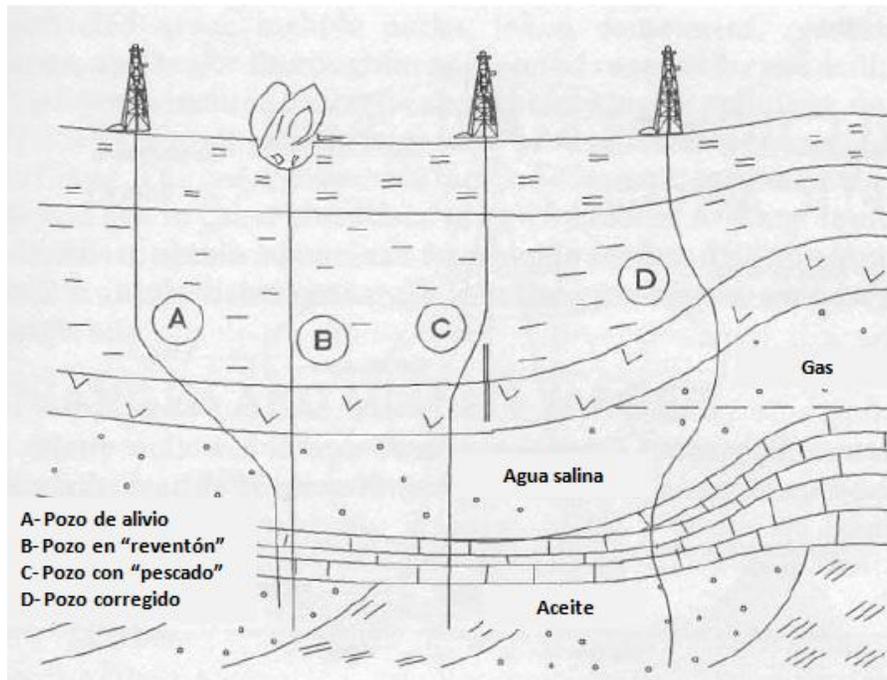
### 1.3 APLICACIONES

La perforación direccional y altamente desviada moderna es un procedimiento de perforación establecido y ampliamente utilizado, fue desarrollado originalmente para operaciones de desvío de la sarta de perforación en pozos tapados por objetos atrapados o “pescados”, pozos de alivio o corregir trayectorias defectuosas del pozo, ver figura 1.3.1.1. Todavía se usa para estos propósitos, pero con el paso del tiempo, se han desarrollado nuevas aplicaciones como perforar hacia domos de aceite y gas tanto en localizaciones costa afuera como en tierra.

Los equipos y técnicas actuales permiten perforar cualquier patrón de perfil de pozo. Los patrones direccionales y altamente desviados tienen aplicaciones como:

- **Desarrollar múltiples pozos desde una sola localización en superficie.** Perforar varios pozos direccionales desde una localización en superficie es una aplicación importante en la perforación direccional, los sitios de perforación de pozos múltiples incluyen plataformas costa afuera, islas artificiales, penínsulas y áreas aisladas, ver figura 1.3.1.2.

Las técnicas modernas de perforación direccional pueden abarcar áreas más grandes que contengan aceite y gas desde una sola localización en superficie, a diferencia de un pozo vertical, que penetra el yacimiento en un solo punto. Por lo tanto, la perforación direccional incrementa la cobertura sustancialmente.



**Fig. 1.3.1.1 Aplicaciones iniciales de la perforación direccional [11].**

Existen muchas ventajas de perforar múltiples pozos direccionales desde la misma localización en superficie, la principal ventaja, es el requerimiento de un solo lugar en superficie lo cual resulta más económico. Por ejemplo, perforar muchos pozos direccionales desde una plataforma, resulta mucho más económico que construir muchas plataformas para pozos verticales, esto mismo ocurre en el caso de áreas con pantanos, junglas y otras áreas debido a los altos costos en la construcción de accesos a dichas localizaciones. Por otro lado, muchas formaciones productoras no contienen suficiente volumen de aceite y gas para justificar el costo de construir plataformas individuales o localizaciones en tierra para construir pozos verticales.

- **Desarrollar pozos en localizaciones inaccesibles en superficie.** Las localizaciones en superficie pueden inhibir el desarrollo de pozos verticales individuales por razones económicas o físicas. Los sitios de perforación en superficie son altamente costosos, y si están disponibles, pueden estar en áreas

residenciales o industriales. Por otro lado, existen normas o leyes que prohíben perforar en ciertas áreas como es el caso de las vías marítimas que deben permanecer abiertas al tráfico naval, también las áreas como parques, lagos, cementerios, áreas recreacionales etc. Donde no se podría perforar debido a cuestiones de seguridad y/o contaminación. También, mantener la infraestructura de producción y transporte a largo plazo en estas zonas sería costoso y el único método razonable de recuperar el gas y el aceite subterráneo en estas situaciones es por medio de la perforación direccional.

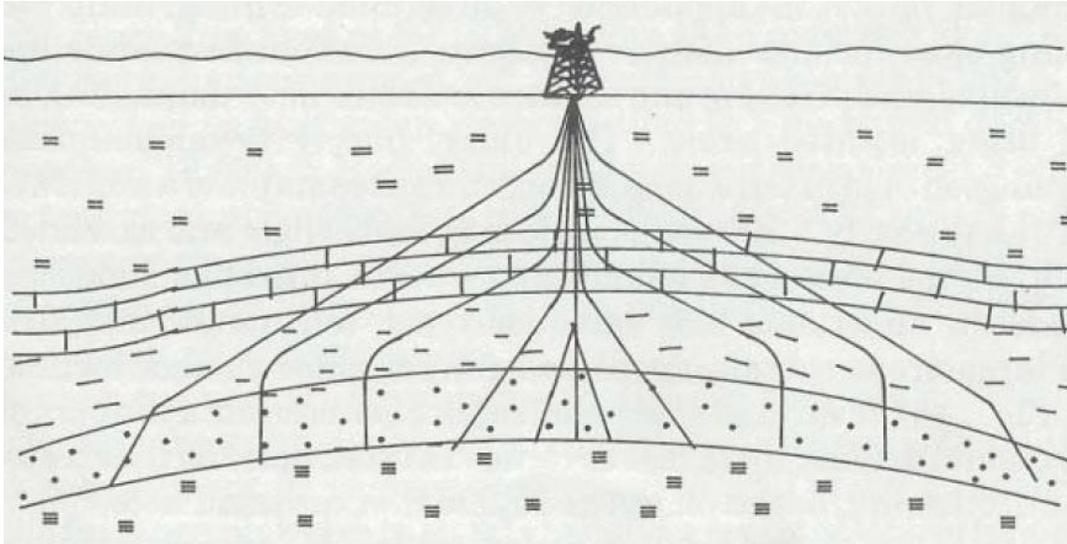


Fig. 1.3.1.2 Perforación de varios objetivos desde una sola localización en superficie [11].

- **Cambio de objetivo y desarrollo de múltiples objetivos.** Muchos pozos no son productivos y la información geológica y de yacimiento obtenidos durante la perforación puede sugerir un área productiva cerca de donde ya se ha perforado, por lo que es común en este tipo de casos realizar una operación de re entrada para perforar en dirección del área productiva. Por ejemplo, un pozo vertical perforado en una zona de agua puede ser re entrado para perforar direccionalmente a la zona de aceite y gas, ver figura 1.3.1.3.

Los pozos pueden ser perforados direccionalmente bajo una localización inaccesible y también direccionalmente hacia múltiples objetivos para realizar terminaciones dobles. También, un pozo con casquete de gas puede ser re entrado hacia la capa de aceite, y en el caso de domos salinos y fallas, éstas pueden ser evitadas por medio del direccionamiento de la perforación, ver figura 1.3.1.4.

Perforar múltiples objetivos es otro procedimiento de la perforación direccional. Los estratos de aceite y gas pueden existir a diferentes profundidades verticales y horizontales. Éstos pueden ser probados y producidos desviando y perforando direccionalmente en estos objetivos múltiples por medio de un solo pozo direccional.

Por otro lado, la perforación y terminación de pozos altamente desviados u horizontales es un procedimiento utilizado para incrementar la productividad del pozo, el cual no puede ser logrado con los verticales o convencionales. Esto se logra perforando una sección curva al final del agujero vertical, seguido de una sección altamente desviada u horizontal en la formación.

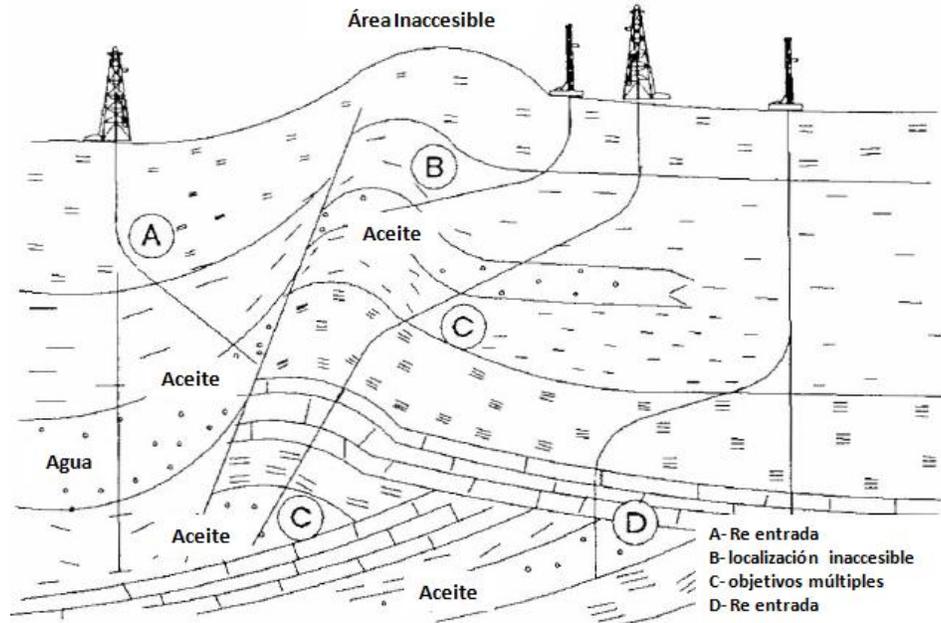


Fig. 1.3.1.3 Aplicaciones actuales de la perforación direccional [11].

Un yacimiento puede requerir menos pozos horizontales para un completo desarrollo comparado a otros métodos de perforación. Los pozos verticales drenan eficientemente una cierta área del yacimiento, por otro lado, los pozos horizontales incrementan el área de drenaje del yacimiento debido a la longitud de la sección horizontal la cual es considerablemente mayor que en pozos verticales, por lo que el resultado neto es el desarrollo de menos pozos horizontales para producir un yacimiento comparado a los pozos convencionales. También, la perforación direccional de pozos altamente desviados, horizontales y de alcance extendido incrementa el área barrida desde una localización en superficie por lo que su eficiencia para exploración, explotación y producción son muy buenas.

Dentro de las aplicaciones principales de los pozos altamente desviados u horizontales podemos señalar las siguientes:

- **Incremento de la productividad del pozo.** Los pozos horizontales tienen mayor ritmo de producción de aceite y gas que los pozos perforados por otros métodos debido a que el área de contacto entre el yacimiento y el pozo limita el flujo de aceite y gas que entra al pozo, en el caso de los pozos horizontales, el área de contacto con el yacimiento es mayor que el de los pozos verticales, como

resultado, se tiene una mayor sección abierta de contacto lo que permite drenar mayor cantidad de volumen de aceite y gas del yacimiento.

La perforación horizontal mejora la productividad en formaciones de baja permeabilidad. Muchos yacimientos tienen aceite y gas pero producen a bajo volumen, por lo que generalmente no son rentables. Sin embargo, en pozos horizontales, se observa un incremento en la velocidad de flujo debido al incremento del área de drene y la reducción del requerimiento de energía desde el yacimiento, dando la posibilidad a muchas formaciones de baja permeabilidad ser rentables. También este tipo de pozos no convencionales son más eficientes cuando son fracturados hidráulicamente debido a que pueden contener mayor cantidad de fracturas, lo que a su vez incrementa la productividad, ver figura 1.3.1.5.

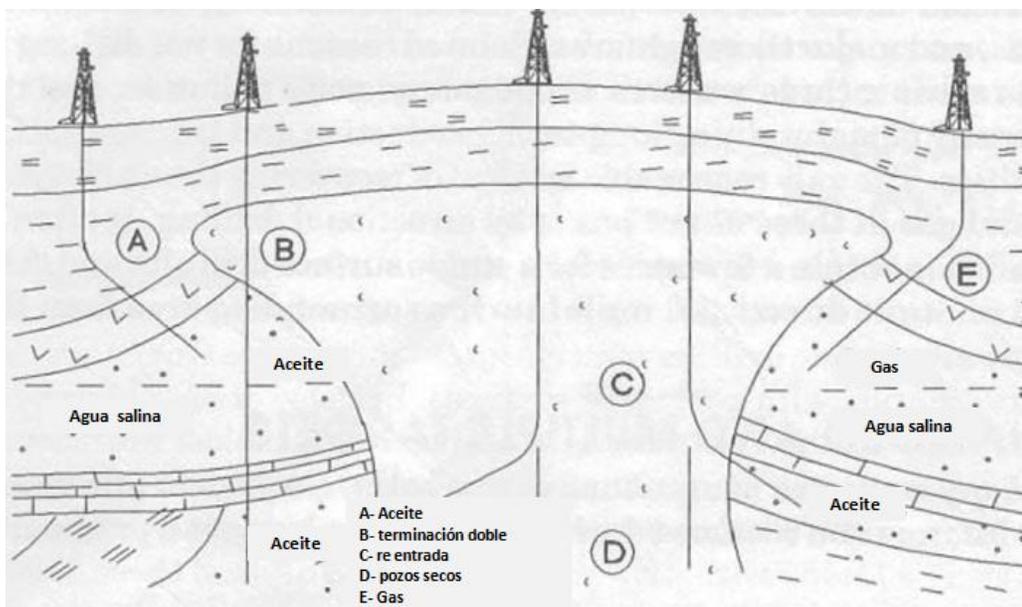
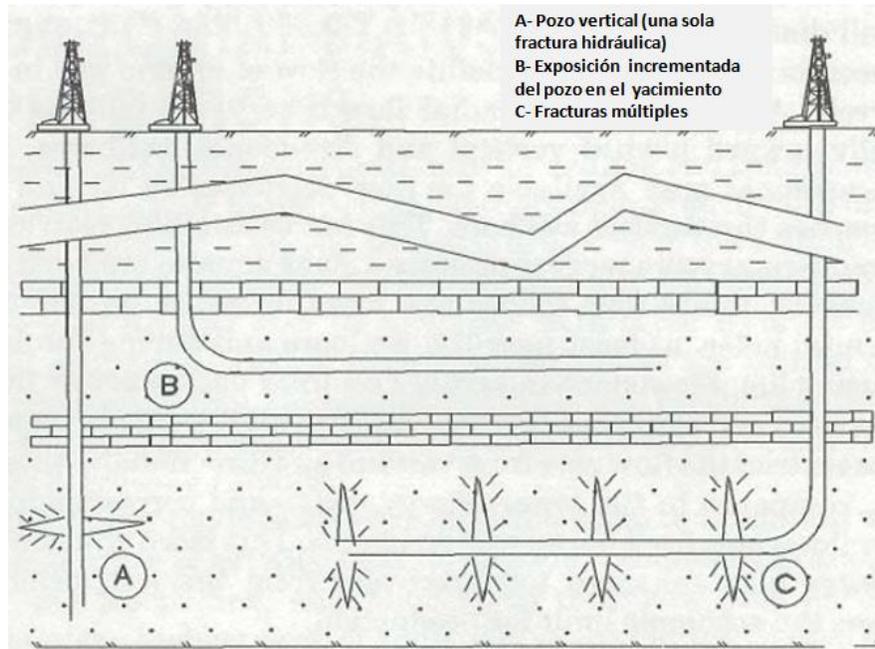


Fig. 1.3.1.4 aplicaciones de la perforación direccional en formaciones con domo salino [11].

- **Fracturas verticales.** Las fracturas verticales naturales o altamente inclinadas frecuentemente contienen hidrocarburos y pueden cubrir amplias áreas que pueden contener gran volumen de hidrocarburos debido a que muchas veces el aceite y el gas fluyen lentamente hacia las fracturas de formaciones adyacentes. Un pozo vertical puede penetrar una fractura pero raramente dos y para ser económicamente viable, generalmente se tienen que atravesar varias. Un pozo horizontal puede penetrar varias fracturas al igual que áreas aisladas de alta permeabilidad que contengan aceite y gas, a diferencia de los pozos verticales, que generalmente entran en una de estas áreas de alta permeabilidad y la velocidad de flujo puede no ser rentable. Un pozo horizontal puede penetrar varias de estas formaciones que generalmente son muy productivas, ver figura 1.3.1.6.
- **Producción de arena y conificación.** La mayoría de los pozos producen a altos gastos con elevadas caídas de presión, sin embargo, los pozos altamente

desviados tienen una sección más grande expuesta en la formación por lo que la caída de presión es menor para una tasa de producción dada.



**Fig. 1.3.1.5 Interacción del perfil de los pozos horizontales con la formación. Mayor área de contacto y eficiencia en el fracturamiento hidráulico [11].**

A mayor caída de presión, la producción de arena se vuelve un problema, especialmente en la producción de yacimientos no consolidados y de granos finos de arena la cual erosiona y atora los equipos y restringe el flujo. El uso de mallas y empacadores de grava que limitan la entrada de arena al pozo también reducen las tasa de producción, sin embargo, la caída de presión que generan los pozos altamente desviados es menor que la producida por los pozos verticales, lo que elimina la necesidad de ventanas y empacadores de grava, permitiendo mayores tasas de producción.

La invasión de agua en el pozo, por el fenómeno de conificación, surge a tasas de producción muy altas y puede ser reducida disminuyendo la caída de presión. El agua subyace frecuentemente al aceite y gas en el yacimiento, por lo tanto, los pozos terminados en las secciones de gas y aceite pueden producir agua ya que las altas caídas de presión causan que el agua fluya hacia arriba conificándose en la sección de producción y mezclándose con el aceite y gas producido, véase figura 1.3.1.7. Los métodos de separación del agua y los hidrocarburos incrementan el costo de producción.

La conificación de gas ocurre en terminaciones en donde la zona de aceite está por debajo de un casquete de gas natural, por lo que las altas caídas de presión causan que el gas fluya hacia abajo conificándose en la sección de producción de aceite, véase figura 1.3.1.7. Es preferible mantener el gas en su lugar para

mantener la energía del yacimiento por lo que los pozos horizontales permiten una mayor tasa de producción correspondiente a menores caídas de presión, lo cual reduce los problemas de conificación de agua y gas.

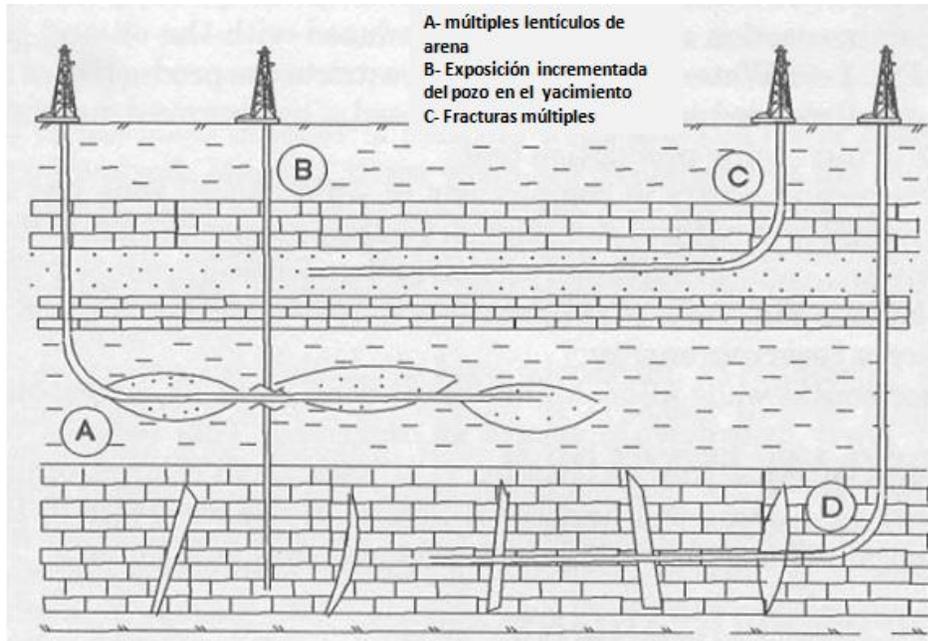


Fig. 1.3.1.6 Interacción del perfil de los pozos horizontales con la formación. Mayor intersección entre formaciones de alta permeabilidad como lenticulos de arena y fracturas verticales naturales [11].

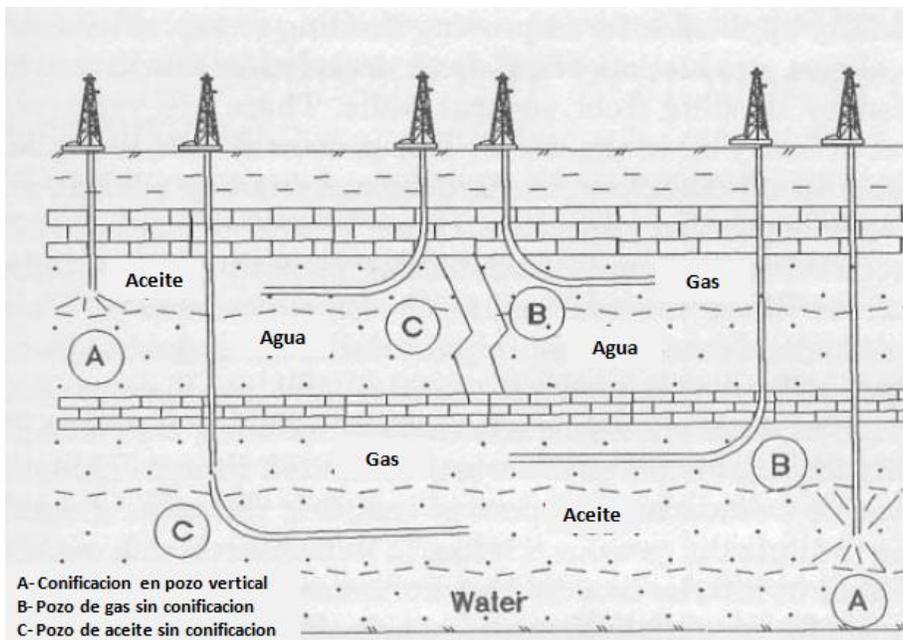


Fig. 1.3.1.7 Efecto del perfil del pozo horizontal vs vertical sobre la conificación de gas y aceite [11].

## 1.4 CONSIDERACIONES ESPECIALES

Existen parámetros críticos que, a diferencia de la perforación convencional, en la perforación pozos direccionales y altamente deben ser monitoreados [3, 13]. Dichos parámetros son:

- **Limpieza del agujero.** Es un parámetro crítico para el éxito en las operaciones de perforación direccional y altamente desviada. En los pozos con alto grado de inclinación, los recortes generados por la barrena caen en la parte baja del agujero alejándose del flujo primario que se encuentra en la parte superior, esto forma lo que se conoce como cama de recortes estacionaria y ocasiona que la remoción de los sólidos se dificulte requiriendo técnicas especiales para su limpieza.

Parámetros de perforación como; el diseño adecuado del ensamble de fondo (BHA), reología del lodo y condiciones del agujero son críticos para tener una limpieza efectiva. Se asegura una buena limpieza circulando baches de alta viscosidad aunado a la técnicas de subir y bajar la tubería rotando.

- **Capacidad de trabajo de la sarta de perforación.** A diferencia de un pozo vertical, la capacidad de trabajo de la sarta de perforación se ve complicada en un pozo direccional y altamente desviado ya que es necesario utilizar gastos más altos a presiones más altas durante la perforación, aunado a mayores fuerzas de torque y arrastre los cuales serán críticos en el rendimiento del aparejo.

En pozos altamente desviados, se perfora con gran parte de la tubería de perforación en compresión en la sección horizontal debido; al peso de la tubería, fuerza de gravedad, arrastre, fricción etc. Después de cierto tiempo, la tubería empezará a degradarse lo que puede causar una falla.

- **Inestabilidad del agujero.** Es un parámetro crítico en pozos direccionales y aun mayor en pozos altamente desviados o de alcance extendido debido; al incremento del ángulo de inclinación, el tiempo de exposición de la formación atravesada y fluctuaciones de la densidad equivalente de circulación.

La pegadura de la sarta de perforación con la formación ocurre con mayor frecuencia en pozos altamente desviados y de alcance extendido. Una mayor densidad del lodo y longitudes más grandes de intervalos expuestos por un mayor tiempo son algunos de los factores que incrementan el riesgo de pegadura diferencial de la sarta comparado con los pozos convencionales. También, la sarta de perforación y el ensamble de fondo estarán reposando en la parte baja del agujero y parcialmente enterrado en recortes.

- **Brotos.** El riesgo de generar un brote durante la perforación de un pozo puede deberse a la presencia de una cama de recortes estática en la pared horizontal del pozo, lo que reduce el área de flujo e incrementa la presión en el pozo. Otro factor que aumenta la probabilidad de generar un brote es el número y distancia de los viajes de la tubería de perforación, los cuales pueden generar un efecto de succión si ésta se retira del pozo con demasiada rapidez. Debido a la gran profundidad desarrollada que alcanzan estos pozos, el riesgo tiende a aumentar durante la realización de esta operación.

- **Torque y arrastre.** Uno de los problemas más significativos asociados a la perforación altamente desviada o de alcance extendido, son los esfuerzos de torque y arrastre sobre la sarta de perforación causada por la fricción entre la sarta de perforación y la pared del agujero. Cuando la sarta de perforación no está rotando, las fuerzas de arrastre son mucho mayores que cuando ésta se encuentra en rotación, por otro lado, el torque depende de las herramientas que conforman la sarta de perforación, por lo que se han desarrollado muchas técnicas para reducir este esfuerzo como son; herramientas mecánicas, lodos lubricantes, técnicas de flotación, etc. Sin embargo, éstas presentan efectos secundarios sobre el pozo.
- **Logística.** Los problemas de logística en pozos direccionales y altamente desviados, son más complejos de manejar que en los pozos convencionales verticales. Por ejemplo, se debe considerar de forma especial; el manejo de grandes cantidades de lodo, grandes cantidades de químicos para fluidos de perforación, limitaciones de peso sobre la torre de perforación, espacio suficiente para las tuberías y alojamiento para el personal involucrado en el desarrollo del pozo.

Los pozos direccionales y altamente desviados son un reto tecnológico y económico, sin embargo, sus ventajas respecto a los pozos convencionales son varias; Alcanzar varios objetivos desde una sola localización en superficie ahorra infraestructura en superficie, por otro lado, se pueden alcanzar objetivos que se encuentran bajo localizaciones en superficie inaccesible y permite cumplir con regulaciones internacionales sobre el medio ambiente que son cada vez más rigurosas, por lo que estos objetivos son alcanzables con la perforación direccional, al igual que se pueden alcanzar objetivos costa afuera desde tierra, islas artificiales o muelles.

La tasa de producción de los pozos altamente desviados es mucho mayor a la de los pozos convencionales, también las operaciones de fracturamiento son más eficientes en este tipo de pozos. Por otro lado, la reducción de problemas de producción como la conificación de agua, gas y producción de arena se ven reducidas a comparación de los pozos convencionales. A largo plazo, los pozos direccionales y horizontales resultan totalmente viables económicamente aunque sean más costosos a corto plazo que los pozos convencionales, esto debido a que es necesario el uso de tecnología especial para la perforación direccional y altamente desviada.

A diferencia de los pozos convencionales, existen consideraciones especiales que deben cuidarse, siendo los principales; la limpieza del agujero, los esfuerzos de torque y arrastre a los que está sometida la sarta de perforación y la presión del fondo del pozo. Estos parámetros se vuelven críticos en pozos altamente desviados y de alcance extendido debido a la acumulación de recortes en el pozo, lo que ocasiona que los esfuerzos sobre la sarta de magnifiquen, por otro lado, se reduce el área de flujo de lodo de perforación, provocando un aumento en la presión de circulación lo que a su vez compromete la estabilidad del agujero.

La limpieza del agujero se lleva a cabo por el transporte de las partículas sólidas generadas por la barrena a la superficie a través del espacio anular del pozo. En los pozos direccionales y altamente desviados la acumulación de recortes incrementa las fuerzas de torque y arrastre de la sarta de perforación, ya que los sólidos llegan a cubrir gran parte de la sarta limitando los grados libertad de la misma. La acumulación de recortes disminuye el área de circulación del lodo de perforación ocasionando un aumento de presión dentro del pozo, lo cual compromete la estabilidad del agujero. El aumento de la concentración de recortes en el pozo igual afecta a los equipos de registros ocasionando errores en la medición.

El transporte de recortes en pozos direccionales y altamente desviados es entonces un fenómeno crítico que involucra a los principales parámetros que deben de cuidarse de forma especial en la perforación de este tipo de pozos.

# **CAPÍTULO 2**

## **2. LIMPIEZA DEL AGUJERO EN POZOS DIRECCIONALES Y ALTAMENTE DESVIADOS**

La limpieza del agujero en la perforación direccional y altamente desviada, es de gran importancia en la industria petrolera y debe ser monitoreada y controlada apropiadamente durante toda la operación de perforación, ya que la remoción inadecuada de los recortes perforados causa problemas serios. Durante la perforación direccional y altamente desviada, la remoción de recortes se vuelve más difícil y si no es controlada apropiadamente, puede resultar en serios problemas como; el atascamiento de la sarta de perforación, lo que provoca que las herramientas se atoren ocasionando incluso la pérdida del pozo, también incrementa los esfuerzos de torque y arrastre sobre la sarta de perforación lo que a su vez incrementa los requerimientos de potencia de rotación y también desvía la barrena de su objetivo, por otro lado, también puede dificultar el asentamiento de la tubería de revestimiento, traduciéndose en problemas de canalización durante la cementación y también provoca interferencia en la toma de registros del pozo [3].

Los factores críticos conocidos que afectan la limpieza del agujero en la perforación de pozos direccionales y altamente desviados son [4,5]:

- Ángulo de inclinación
- Velocidad de flujo
- Régimen y viscosidad del fluido
- Rotación de la sarta de perforación
- Excentricidad de la sarta de perforación

Algunos parámetros que han sido usados para estudiar el transporte de sólidos en pozos direccionales y altamente desviados son:

- Velocidad mínima de transporte o MTV
- Altura de la cama de sólidos estacionaria

Se han identificado dos velocidades mínimas de transporte en pozos desviados [5]; El primero ocurre cuando el fluido que circula en el pozo tiene una velocidad suficientemente alta para que los sólidos se deslicen o rueden a lo largo de la pared inferior del espacio anular y el segundo, donde la MTV es suficientemente alta para que los recortes sean suspendidos y transportados junto con el fluido circulante en el pozo, por lo que ésta última debe ser mucho mayor que la MTV para el transporte de sólidos por rodamiento o deslizamiento.

Cuando el fluido circulante en el pozo no alcanza la velocidad mínima de transporte, los sólidos se empiezan a acumular en la pared inferior del pozo formando una cama de sólidos estacionaria, ésta cama comienza a llenar el espacio anular y a ocupar gran parte de la sarta de perforación si no son transportados.

## 2.1 PATRONES DE FLUJO

El flujo de la mezcla bifásica sólida y líquida muestra diferentes patrones de flujo basado en observaciones visuales de la fase sólida dispersa, la clasificación general de estos patrones de flujo basados en la distribución de los sólidos son [6]; flujo totalmente en suspensión con dos sub patrones – (a) pseudohomogeneo y (b) heterogéneo, (c) flujo con una cama móvil y (d) flujo con una cama estacionaria, véase la figura 2.1.1.

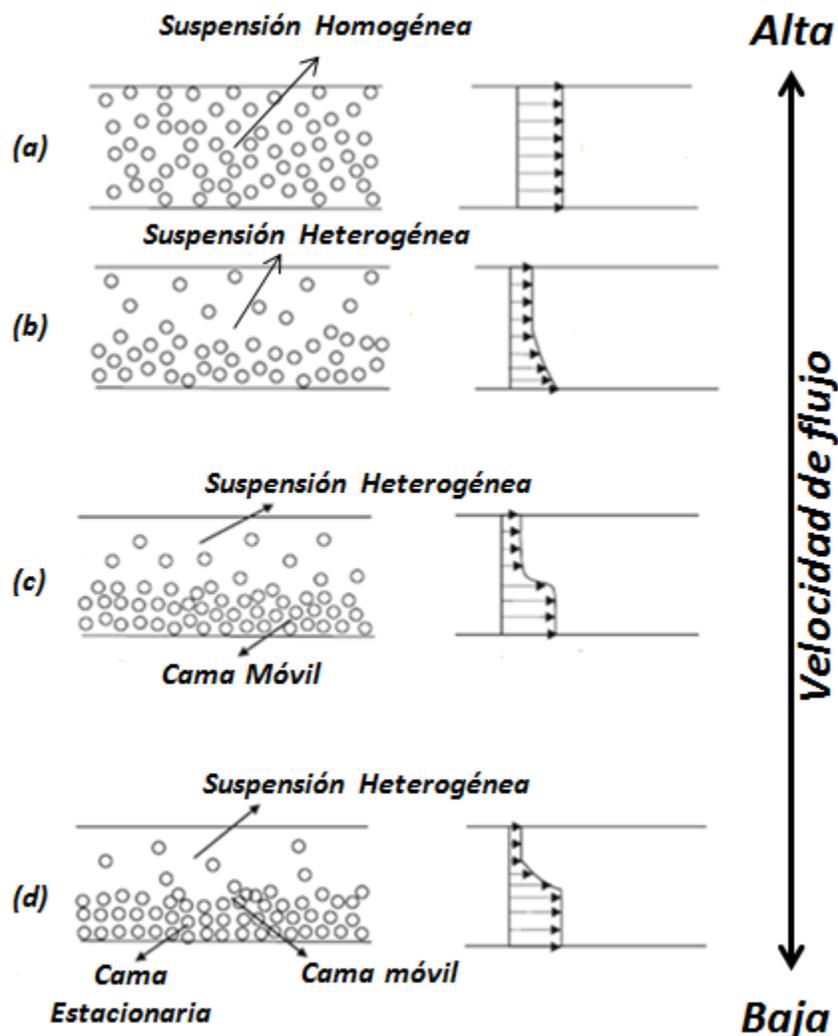


Fig. 2.1.1 Patrones de flujo identificados experimentalmente [6].

El patrón de flujo totalmente suspendido ocurre cuando los sólidos son suspendidos uniformemente a través del área transversal del canal que los transporta debido a una

velocidad de flujo relativamente alta, lo que resulta en una suspensión pseudohomogénea, véase figura 2.1.1 (a). Si los sólidos están distribuidos arbitrariamente en la dirección normal a la dirección del flujo, se forma una gradiente de concentración resultando en una suspensión heterogénea, véase figura 2.1.1 (b).

Si la velocidad del fluido es disminuida, se genera el flujo con una cama móvil en la cual las partículas sólidas se acumulan en el fondo del canal que los transporta, resultando en una capa de sólidos densamente compactados también denominada cama de sólidos móvil. La capa de cama de sólidos se mueve a lo largo de la parte inferior del canal y por encima de ella se forma una capa suspensión heterogénea que cubre el resto del canal, véase figura 2.1.1 (b).

A velocidades todavía más lentas, se forma el patrón de flujo con una cama estacionaria donde los sólidos se acumulan en el fondo del canal y se mantienen estáticas, resultando en la formación de una capa de sólidos densamente compacta y que además se mantiene inmóvil, esta capa también se denomina cama de sólidos estacionaria. A ciertas condiciones de flujo, se ha observado encima de la cama estacionaria la formación de una cama de sólidos móvil delgada. El resto del canal es cubierto por una capa de flujo en suspensión heterogénea, véase figura 2.1.1 (d). En la figura 2.1.2 se observa la formación de la cama estacionaria en dos y tres capas observadas en estudios experimentales llevados a cabo por Kelissidis [7].

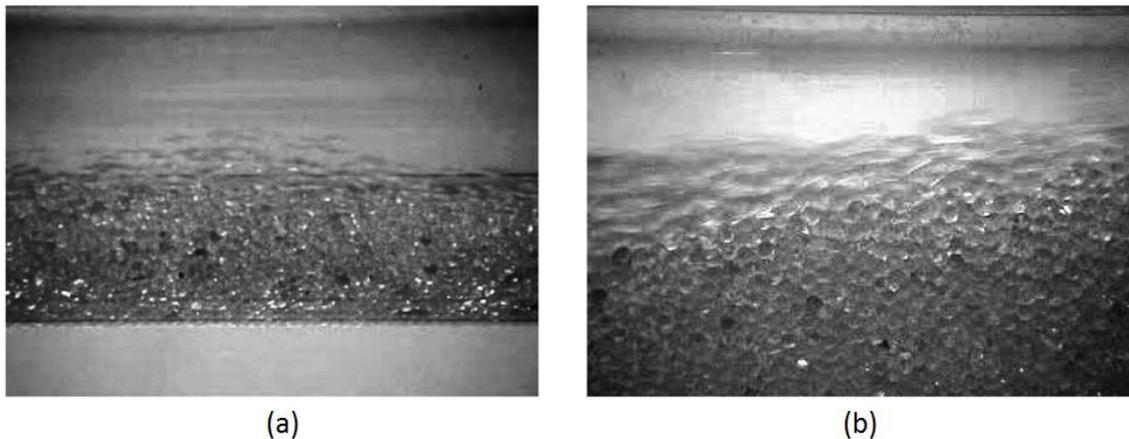


Fig. 2.1.2 Flujo con cama estacionaria en (a) dos y (b) tres capas [7].

## 2.2 PARAMETROS CRÍTICOS

Tomren [4] y J. T. Ford [5] realizaron estudios experimentales a escala real y concluyeron que la limpieza del pozo es sensible a parámetros como; el ángulo de inclinación del pozo, velocidad promedio del lodo de perforación, régimen de flujo, viscosidad del fluido, excentricidad y rotación de la sarta de perforación. A continuación, se analiza cada uno de estos parámetros y sus efectos en la acumulación de los sólidos en el pozo.

## 2.2.1 ANGULO DE INCLINACIÓN DEL POZO

Una partícula sólida sumergida en un fluido que circula dentro un canal con inclinación desde la vertical  $\alpha$  tiene una velocidad de resbalamiento  $v_t$  que se descompone en una velocidad resbalamiento axial en contra del flujo denominado  $v_{ta}$  y una velocidad de resbalamiento radial denominado  $v_{tr}$  [13], véase figura 2.2.1.1. Cuando el pozo es totalmente vertical, se tiene entonces que la velocidad resbalamiento de la partícula es igual a la axial y no existe la componente de velocidad de resbalamiento radial.

$$v_t = v_{ta} \quad \text{Ec. 2.2.1.1}$$

Esta situación cambia si el pozo tiene inclinación dando lugar a las componentes de la velocidad de resbalamiento como:

$$v_{ta} = v_t \cos \alpha \quad \text{Ec. 2.2.1.2}$$

$$v_{tr} = v_t \sin \alpha \quad \text{Ec. 2.2.1.3}$$

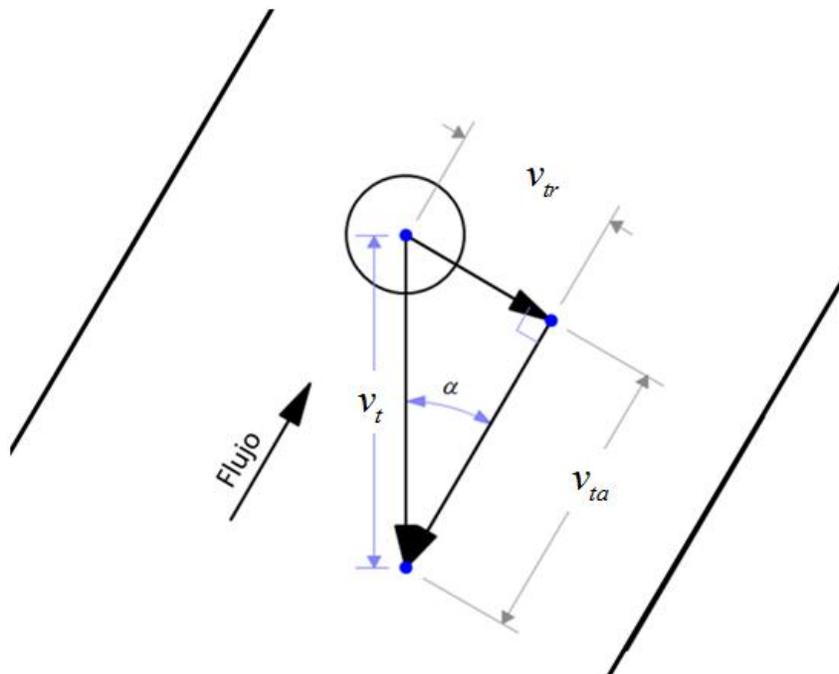
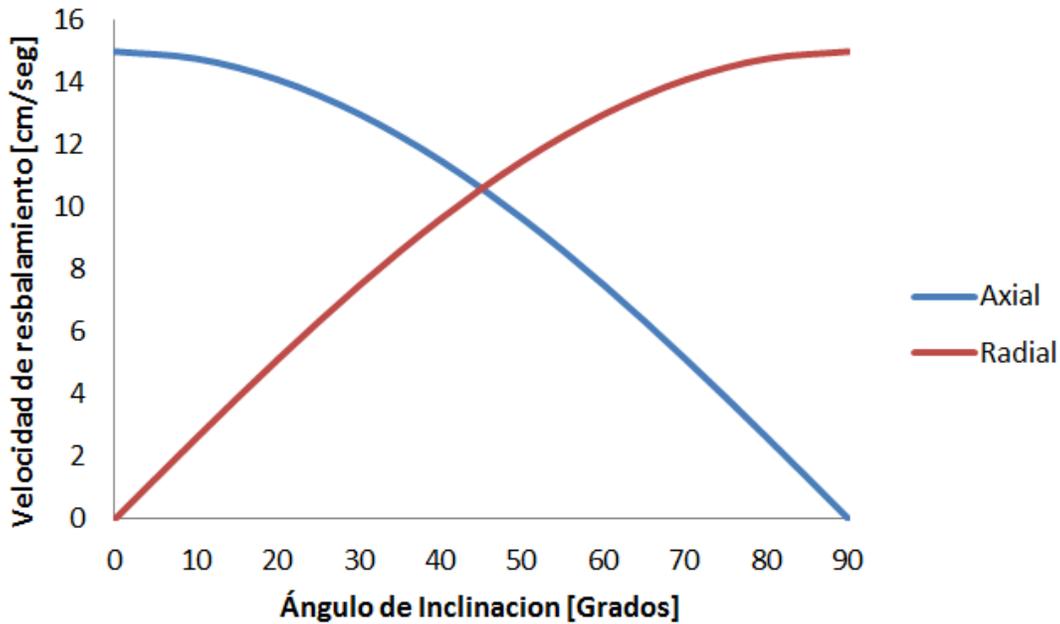


Fig. 2.2.1.1 Componentes de la velocidad de resbalamiento o asentamiento de la partícula

Cuando el ángulo de inclinación es incrementado, la componente axial de la velocidad de resbalamiento decrece alcanzando cero en la posición horizontal del pozo. Al mismo tiempo la componente radial alcanza su máximo valor en la posición mencionada, ver gráfica 2.2.1.2. Tomando estas condiciones en cuenta, todos los factores que pueden promover el transporte de recortes tendrán un efecto disminuido a medida que aumenta el ángulo de inclinación.

Los fenómenos de transporte de partículas sólidas observados en pozos direccionales y altamente desviados se pueden agrupar en cuatro regiones angulares del perfil del pozo [4], véase figura 2.2.1.3.

- Vertical y cerca de la vertical  $\alpha \leq 10^\circ$
- Ángulos bajos de inclinación  $10^\circ < \alpha \leq 30^\circ$
- Ángulos de transición o crítico  $30^\circ < \alpha < 60^\circ$
- Altos ángulos de inclinación  $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$



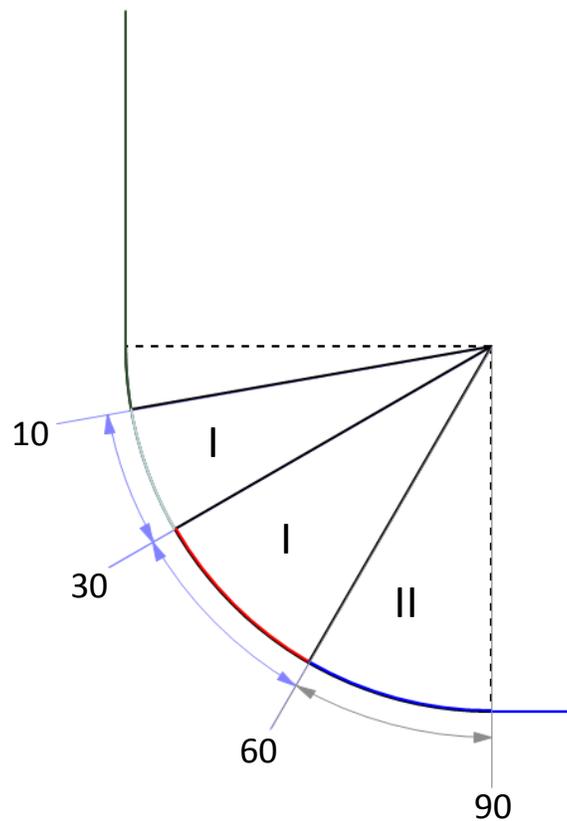
Gráfica. 2.2.1.2 Velocidad de las componentes asentamiento de la partícula a distintos ángulos de inclinación del pozo medidos desde la vertical.

Los fenómenos observados en estudios experimentales [4] según las regiones angulares anteriores son los siguientes:

- **Vertical y cerca de la vertical  $\alpha \leq 10^\circ$ .** En el rango vertical y cerca de la vertical, se observa que a  $10^\circ$  de inclinación el movimiento de recortes y concentraciones son ligeramente distintas que en las pruebas totalmente verticales. La interferencia se observa a ángulos de inclinación mayor a  $10^\circ$ , por lo que la perforación vertical y cerca de la vertical no se plantea ningún problema. A mayores ángulos de inclinación, se presentan varios grados de acumulación de recortes y se requiere de mayor velocidad del flujo, ver gráfica 2.2.1.4.

El movimiento axial de las partículas es mucho menor en el área reducida del espacio anular excéntrico, especialmente en flujo laminar. A  $10^\circ$  de inclinación las partículas son transportadas mayormente en la parte inferior del espacio anular a baja velocidad de flujo. A medida que se incrementa la velocidad de flujo, la distribución de las partículas se vuelve más uniforme.

- **Ángulos bajos de inclinación**  $10^\circ < \alpha \leq 30^\circ$ . El comportamiento de las partículas cambia gradualmente a medida que el ángulo de inclinación incrementa más allá de los  $10^\circ$ . Debido al incremento de la velocidad de resbamiento radial, mayor cantidad de partículas son forzadas hacia la parte inferior del espacio anular. Esto ocasiona la formación de la cama de recortes estacionaria, especialmente a baja velocidad de flujo. A velocidades menores de  $0.61 \text{ m/seg}$ , se forma la cama estacionaria, ver gráfica **2.2.1.4**. Esta cama es pequeña e inestable, especialmente en flujo turbulento con rotación de la tubería interna.

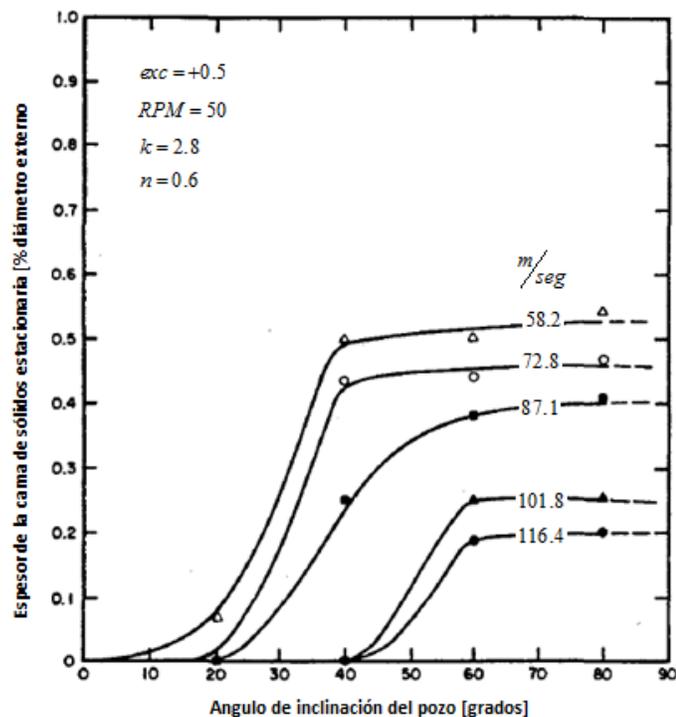


**Fig. 2.2.1.3 Componentes de la velocidad de resbamiento o asentamiento de la partícula**

En los estudios experimentales, se observó que después de la inyección de partículas en la línea de flujo los recortes van hacia la parte inferior del espacio anular y eventualmente se reintegran a la región de alta velocidad en medio del espacio anular, después son barridas hacia arriba y el proceso se repite, este fenómeno es conocido como “reciclaje de partículas”. A velocidades mayores de  $0.61 \text{ m/seg}$  [4], las partículas son inestables para formar una cama de recortes estacionaria y son transportados mayormente en la parte inferior del espacio anular en cúmulos que ocasionalmente llenan todo el espacio anular. Estos se forman en regímenes laminar y turbulento. A velocidades mayores a  $0.91 \text{ m/seg}$ , no se presenta cama de recortes ni cúmulos. Los recortes son transportados

suavemente en la parte inferior del espacio anular [4]. Este fenómeno de transporte es conocido como flujo heterogéneo.

- **Ángulos de transición**  $30^\circ < \alpha < 60^\circ$ . La formación de la cama de recortes ocurre a velocidades menores de  $0.76 \text{ m/seg}$  a  $40^\circ$  de inclinación y menor a  $0.91 \text{ m/seg}$  a  $50^\circ$  de inclinación, ver gráfica 2.2.1.4. Por otro lado, la cama resbala usualmente en contra del flujo del fluido, lo que resulta en una alta concentración de recortes. En flujo turbulento y con rotación de la tubería interna se desestabiliza la cama de recortes y el efecto de la rotación de la tubería hace que la cama se mueva circunferencialmente. En flujo laminar, muy pocas partículas son transportadas a lo largo del pozo hasta que se forma la cama de recortes y reduce el área de flujo en el espacio anular, lo que ocasiona una velocidad suficientemente alta para transportar los recortes que no están en la cama. A velocidades mayores de  $0.91 \text{ m/seg}$  no existe cama de recortes, especialmente en flujo turbulento [4]. También los recortes viajan en cúmulos y cuando existe la tendencia de formarse una cama de recortes, esta es inestable, no es constante en su longitud axial y ocurre el fenómeno de reciclaje de partículas. También la cama de recortes no es constante en espesor, ésta crece y a su vez decrece, desarrollando un fenómeno descrito como de pseudo equilibrio [4] causado por el incremento del espesor de la cama que reduce el área del flujo por lo que se incrementa la velocidad de circulación y finalmente provoca la erosión de la cama, al incrementar nuevamente el área de flujo se reduce la velocidad de flujo y se repite el proceso.



Gráfica. 2.2.1.4 espesores de la cama de sólidos estacionaria a distintos ángulos de inclinación del pozo [4].

Los ángulos de inclinación  $40^\circ$  y  $50^\circ$  son críticos no solo por la generación de la cama de recortes, si no por las fuerzas de gravedad que hacen que ésta se deslice hacia abajo en contra de la dirección del flujo. Cuando la velocidad del fluido se hace cero, todas las partículas caen en avalancha y bloquean el espacio anular, esto es una situación peligrosa en las operaciones de perforación ya que pueden causar el atascamiento de la sarta, a menos que todos los recortes sean transportados antes de viajar la misma.

**Altos ángulos de inclinación**  $60^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ . La formación de cama estacionaria es instantánea a estos grados de inclinación y no se desliza en sentido contrario al movimiento del flujo de fluido, inclusive cuando la velocidad es cero. Por otro lado, la rotación de la tubería interna mueve la cama de recortes en sentido tangencial, lo que causa una altura mayor en un lado del espacio anular. Además, el efecto de rotación sacude continuamente los recortes fuera de la cama hacia la línea de flujo encima de la cama, especialmente en flujo turbulento. Las partículas encima de la cama estacionaria forman otras dos zonas; la primera es una capa delgada de partículas estrechamente agrupadas moviéndose axialmente por encima de la cama y la segunda, encima de la capa antes mencionada, consiste en partículas esparcidas viajando de forma suave en flujo heterogéneo. La velocidad observada para erosionar por completo la cama de sólidos estacionaria es aproximadamente  $150 \text{ m/seg}$  [4].

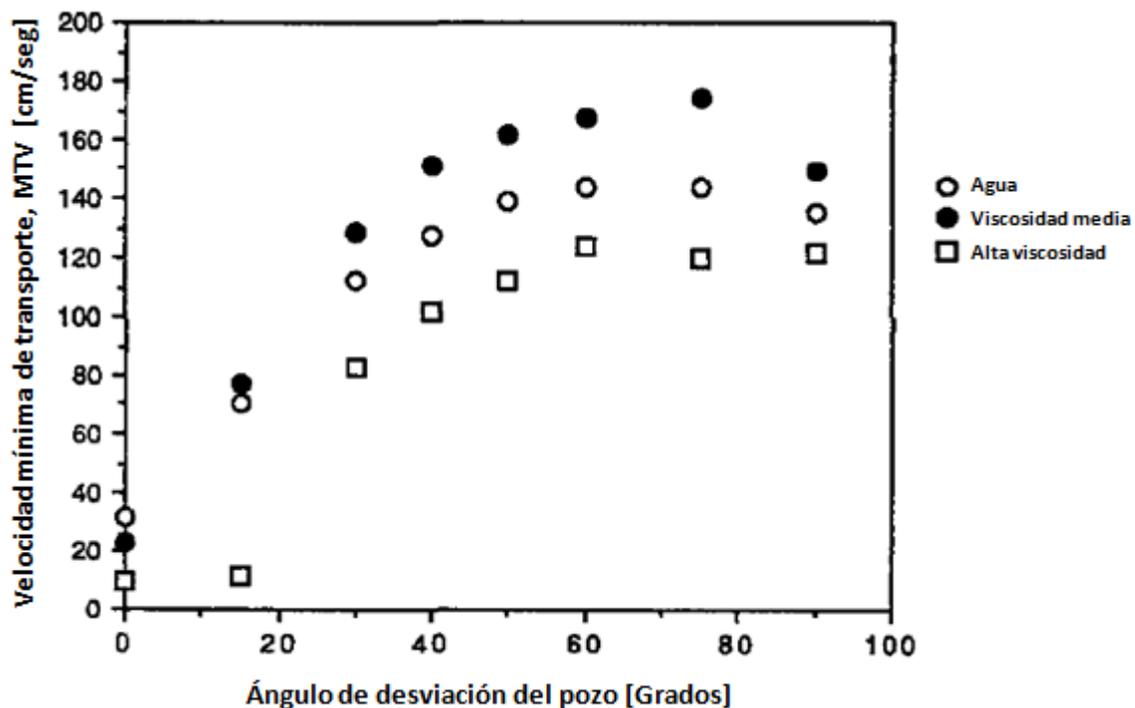
### 2.2.2 VELOCIDAD DE FLUJO

La velocidad del fluido en perforación vertical tiene que ser suficiente para evitar que los recortes se asienten y para transportarlos a superficie en un tiempo razonable. En el caso de pozos inclinados, la componente axial de la velocidad de resbalamiento juega un rol menos importante y se puede concluir que para tener un transporte satisfactorio, la velocidad anular del fluido puede ser más lenta que en el caso vertical, sin embargo, es una conclusión engañosa ya que el incremento de la componente radial de la velocidad de resbalamiento empuja a la partícula hacia la pared inferior del espacio anular, causando que se forme una cama de partículas. Consecuentemente, la velocidad anular del fluido tiene que ser suficientemente rápida para evitar, o al menos limitar, la formación de la cama. Por lo tanto, esta velocidad tiene que ser mayor que la necesaria en el caso vertical. En la gráfica **2.2.1.4** se observa que el espesor de la cama de recortes estacionaria disminuye a medida que la velocidad anular promedio aumenta [4].

Ford [5] realizó investigaciones experimentales de transporte de sólidos en pozo desviados y definió el término de velocidad mínima de transporte, MTV por sus siglas en inglés, donde la totalidad de los sólidos en el espacio anular son transportados en suspensión y no se formaría la cama sólidos estacionarios, también descubrió que la magnitud de la MTV depende del ángulo de inclinación del pozo. En la gráfica **2.2.2.1**, a partir de ángulos  $\alpha > 30^\circ$ , la MTV para iniciar el rodamiento de los recortes incrementa a medida que el ángulo de inclinación incrementa hacia la horizontal. Sin embargo, la MTV requerida para transportar los recortes alcanza un valor máximo y decrece a medida que se sigue aumentando el ángulo de inclinación hacia los  $90^\circ$  [5].

### 2.2.3 RÉGIMEN Y VISCOSIDAD DEL FLUJO

Un fluido en flujo turbulento siempre induce un régimen turbulento en el resbalamiento de la partícula independientemente de la forma y dimensión de la misma, es por ello que el factor que determina la velocidad de resbalamiento de la partícula son las fuerzas de momento del fluido, por lo que no existe influencia de la viscosidad del fluido en este caso [13]. Si el fluido fluye en régimen laminar, entonces dependiendo de la forma y dimensión de la partícula, se puede esperar un resbalamiento turbulento o laminar [13]. El régimen laminar de resbalamiento siempre proveerá un valor bajo de velocidad de resbalamiento y se concluye que el flujo laminar usualmente proveerá un mejor transporte que el turbulento. Sin embargo, en el caso de pozos inclinados, la componente axial de la velocidad de resbalamiento se reduce por lo que la ventaja del flujo laminar disminuye a medida que aumenta la inclinación del pozo [4].

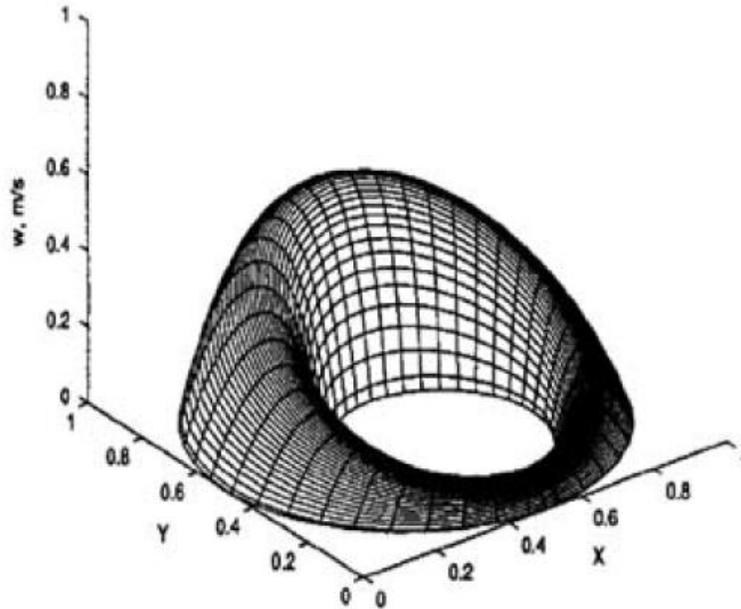


Gráfica. 2.2.2.1 Efecto del ángulo de inclinación del pozo sobre la MTV para suspender los sólidos [5].

En la gráfica 2.2.2.1, se observa que la MTV requerida para iniciar la suspensión de los recortes es dependiente de las propiedades reológicas del fluido y que para todos los tipos de fluidos, es dependiente también del ángulo de inclinación, sobre los 40° y por abajo del mismo. Se observa también, que a todos los ángulos de inclinación, el fluido de viscosidad media tiene una mayor MTV para iniciar la suspensión de los recortes que un fluido de alta viscosidad. La MTV para el fluido agua está entre el fluido medio y alto, lo que significa que la MTV a parte ser dependiente de la reología también depende del régimen de flujo como se comentó anteriormente [4,5].

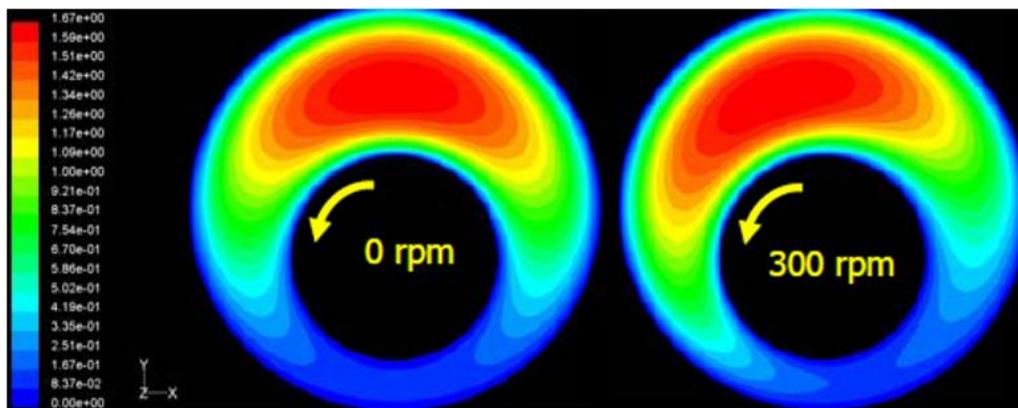
## 2.2.4 EXCENTRICIDAD DE LA SARTA DE PERFORACIÓN

La posición de la tubería interna puede variar radialmente y su desplazamiento hacia la pared inferior del pozo, excentricidad positiva, reduce la velocidad del fluido en esta área. En la gráfica 2.2.4.1 se muestra claramente como el perfil de velocidad se reduce en el área estrechada debido a la excentricidad de la tubería, ocasionando que en esta zona los sólidos sean transportados de manera menos eficiente y se comiencen a asentar más fácilmente [13].



Gráfica. 2.2.4.1 Excentricidad y su efecto en el perfil de velocidad en el espacio anular [6].

## 2.2.5 ROTACIÓN DE LA SARTA DE PERFORACIÓN

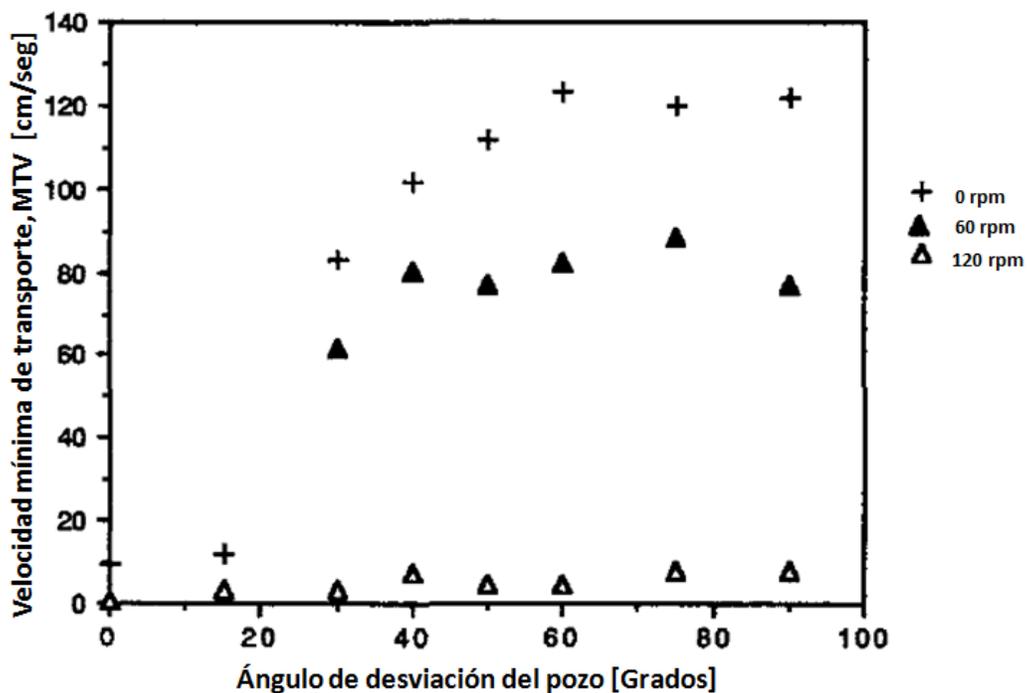


Gráfica. 2.2.5.1 Efecto de la rotación de la tubería interna sobre el campo de velocidades en el espacio anular [14].

Más allá del flujo de fluido axial, un flujo tangencial se experimenta mientras que la tubería interna esta rotando, por lo que un efecto de turbulencia es experimentado como

resultado del flujo tangencial provocando una acción erosiva sobre la cama de recortes. Aunque este parámetro influye sobre la cama de recortes, es considerado como un efecto menor sobre la generación u erosión de la cama de sólidos estacionaria [4].

En la gráfica **2.2.5.1** se observa el campo de velocidades, rojo la más alta y azul la más baja, para una tubería interna estática y otra dinámica a 300 rpm. Cuando la tubería está girando, vemos que el campo de velocidades se mueve en dirección del giro de la sarta, por lo que la cama de sólidos se va a acumular en la zona de menor velocidad debido a la excentricidad de la tubería y ligeramente movida tangencialmente. En la gráfica **2.2.5.2** se muestra el efecto de la rotación de la tubería interna sobre la velocidad mínima de transporte por suspensión de los sólidos. Claramente el incremento de la velocidad de rotación hace que la velocidad necesaria para suspender las partículas disminuya.



Gráfica. 2.2.5.2 Efecto de la rotación de la tubería interna sobre la MTV de suspensión [5].

# CAPÍTULO 3

## 3. MECANISMO DE TRANSPORTE

Las partículas sólidas generadas por la barrena en el proceso de perforación de pozos direccionales y altamente desviados están sometidas a cuatro fuerzas principales; flotación, gravedad, arrastre y levantamiento, por lo que existirá un movimiento relativo entre la fase sólida dispersa y la fase líquida continua a menos que; (1) las partículas formen un gel y sean capturadas en el sistema, (2) exista una interacción muy fuerte entre la fase continua y la dispersa y formen una sola fase, (3) ambas fases tengan la misma densidad y sus momentos de inercia sean indiferenciables [6].

Es generalmente aceptado que las partículas permanecen en suspensión a una velocidad de flujo alta debido a los efectos de turbulencia. Estos efectos son suficientemente fuertes para sobrepasar la tendencia de las partículas a depositarse, por lo que las partículas son sostenidas en suspensión contra la fuerza de gravedad por una combinación de resistencia viscosa y difusión por turbulencia. El mecanismo que gobierna la dispersión de partículas sólidas en la capa de suspensión es la bien conocida ecuación de difusión y convección.

A continuación se plantearán las bases físicas sobre las que se desarrollará el modelo en estudio.

### 3.1 ASENTAMIENTO

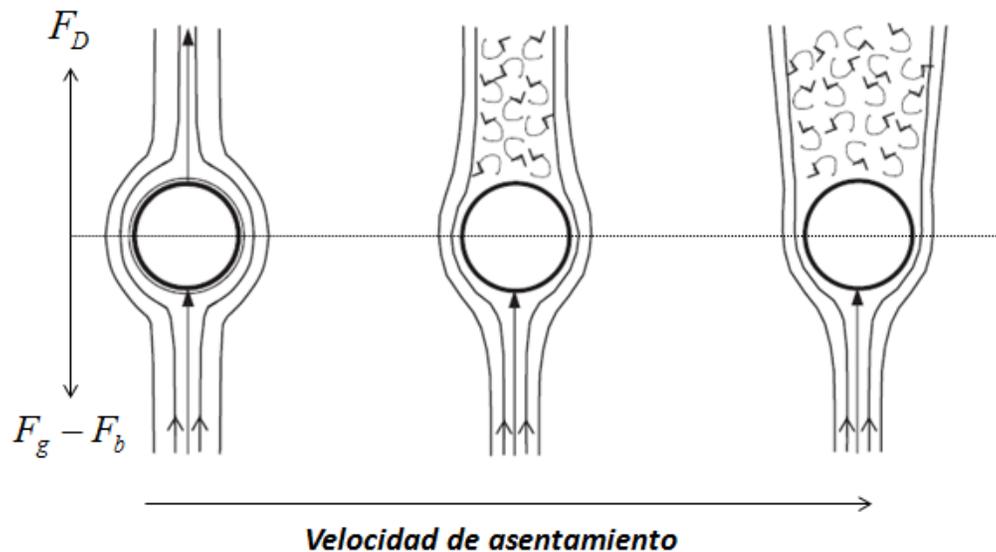


Figura. 3.1.1 Flujo alrededor de una esfera cayendo libremente dentro de un fluido estancado [6].

Una partícula sólida, debido a su densidad más alta respecto a la del fluido de perforación, tiende a asentarse a una velocidad constante conocida como velocidad terminal de asentamiento o resbamiento denominada  $v_t$ . La velocidad de asentamiento de cualquier partícula está en función de las propiedades físicas del fluido que lo contiene y las propiedades físicas del sólido. Existen dos fuerzas principales involucradas en este fenómeno; gravedad, flotación y resistencia al avance o arrastre, véase la figura 3.1.1.

La fuerza gravitacional  $F_g$ , de una partícula expresada en términos del diámetro de la partícula es definida como:

$$F_g = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p g \quad \text{Ec. 3.1.1}$$

Donde  $\rho_p$  es la densidad de la partícula y  $g$  es la aceleración debido a la gravedad de  $9.81 \text{ m/seg}$  en la superficie de la tierra. El efecto de flotación es causada por la presión diferencial en la porción baja del objeto siendo más alta que la porción de la cima. El resultado es una fuerza que apunta en dirección opuesta a la gravedad y es calculada mediante el principio de Arquímedes el cual dice que la magnitud de la fuerza de flotación es igual al peso del fluido desplazado. Por lo que la fuerza de flotación  $F_b$  es proporcional al volumen de líquido que es desplazado, la aceleración gravitacional y la densidad del fluido  $\rho$  y es definido como:

$$F_b = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho g \quad \text{Ec. 3.1.2}$$

El peso neto de una partícula sólida sumergida en un fluido es la diferencia entre la fuerza de gravedad y la de flotación:

$$W = F_g - F_b \quad \text{Ec. 3.1.3}$$

Finalmente tenemos el peso neto como:

$$W = \frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_s - \rho) g \quad \text{Ec. 3.1.4}$$

La fuerza que se opone al movimiento de un cuerpo dentro de un fluido es llamada fuerza de arrastre  $F_D$  y depende de la velocidad relativa, viscosidad y densidad del medio, la forma, área expuesta al flujo y rugosidad de la superficie del cuerpo. La fuerza de arrastre siempre actúa en la dirección opuesta a la velocidad de la partícula y es expresada como:

$$F_D = \frac{\pi}{8} d_p^2 C_D \rho u^2 \quad \text{Ec. 3.1.5}$$

Donde  $C_D$  es el coeficiente de arrastre y  $u$  es la velocidad de la partícula relativa al medio. Chien [15] propuso una correlación basado en estudios experimentales, véase gráfica 3.1.2, del coeficiente de arrastre y el número de Reynolds para partículas irregulares

sumergidas en fluidos newtonianos, no newtonianos y números de Reynolds en el rango de 0.001 y 200 000. Es definida como:

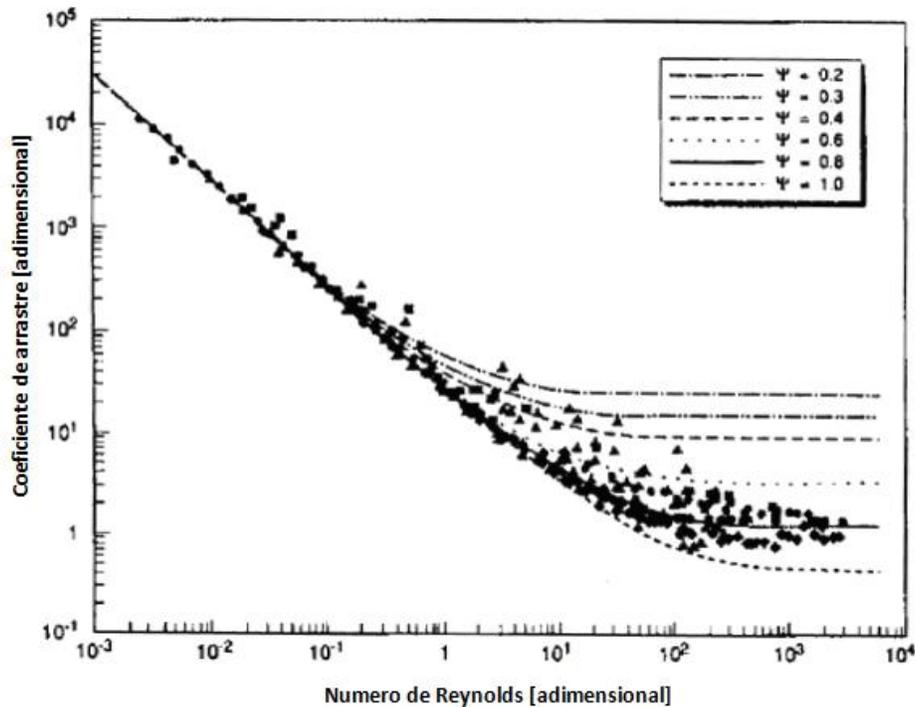
$$C_D = \frac{30.0}{\text{Re}_p} + \frac{67.289}{e^{5.030\psi}} \quad \text{Ec. 3.1.8}$$

$$0.2 \leq \Psi \leq 1.0$$

Donde  $\Psi$  es la esfericidad de la partícula irregular dado por:

$$\psi = \frac{a}{a_p} \quad \text{Ec. 3.1.9}$$

Donde  $a$  es el área de una esfera con el mismo volumen que el de la partícula sólida y  $a_p$  es el área de la partícula sólida.



Gráfica 3.1.2 Relación entre el coeficiente de arrastre y número de Reynolds a diferentes esfericidades de la partícula [15].

La suma de fuerzas sobre el centro de la partícula sólida de forma esférica sumergida en un fluido y cayendo libremente es entonces [6]:

$$F_g - F_b - F_D = 0 \quad \text{Ec. 3.1.10}$$

Sustituyendo las definiciones de las fuerzas involucradas:

$$\frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_s - \rho) g - \frac{\pi}{8} d_p^2 C_D \rho u^2 = 0$$

Ec. 3.1.11

Resolviendo la velocidad  $u$  de la ecuación 3.1.11 obtenemos la velocidad terminal de libre asentamiento o resbalamiento de la partícula sólida, ecuación 3.1.12.

$$v_t = \left[ \frac{4 (\rho_p - \rho) d_p g}{3 \rho C_D} \right]^{1/2}$$

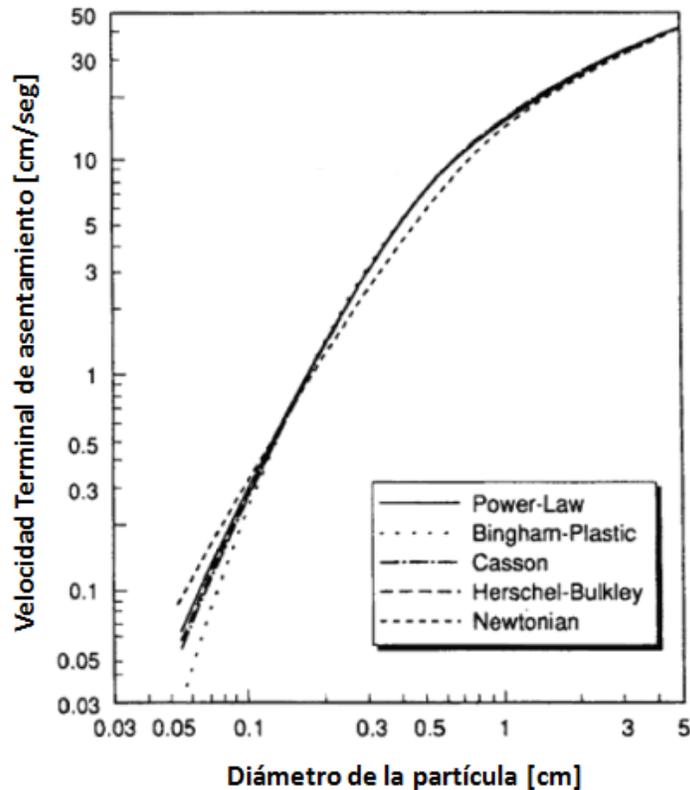
Ec. 3.1.12

Chien [15] propuso una correlación para la velocidad de libre asentamiento de una partícula sólida irregular, fluidos newtonianos, no newtonianos y números Reynolds en el rango de 0.001 a 200 000. Es definida como:

$$v_t^2 + 4.458 e^{5.030\psi} \left( \frac{\mu_e}{d_p \rho} \right) v_t - 19.449 e^{5.030\psi} d_p \left( \frac{\rho_p}{\rho} - 1 \right) = 0$$

Ec. 3.1.13

Donde  $\mu_e$  es la viscosidad efectiva del fluido en circulación.



Gráfica 3.1.3 Efecto del diámetro de la partícula sobre la velocidad terminal de asentamiento con diferentes modelos reológicos [15].

A medida que la concentración de sólidos incrementa en la suspensión, la interacción entre las partículas es afectada por la presencia de otras partículas cercanas, por lo que la velocidad de asentamiento se verá “obstaculizada” [6]. Introduciendo un factor de corrección para la velocidad de libre asentamiento de la partícula obtenemos la velocidad de asentamiento obstaculizado  $v_{ht}$  definida como:

$$v_{ht} = v_t h(c) \quad \text{Ec. 3.1.14}$$

Donde  $h(c)$  es el factor de corrección en función de la concentración de la suspensión. Thomas [16] propuso una correlación para la velocidad de asentamiento obstaculizado en función de la concentración total de partículas sólidas.

$$v_{ht} = v_t e^{-5.9c} \quad \text{Ec. 3.1.15}$$

Donde  $c$  es la concentración de sólidos.

### 3.2 RODAMIENTO

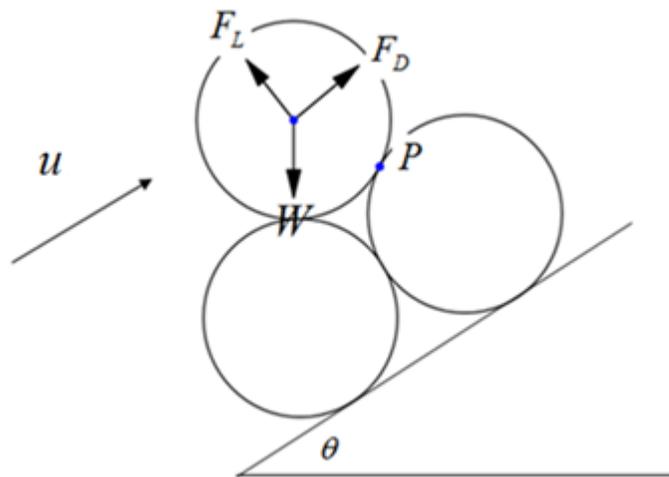


Figura 3.2.1 Fuerzas sobre una cama de esferas sometida a una corriente de flujo

Una corriente de flujo de fluido con velocidad  $u$  sobre una partícula sólida, esférica y reposando sobre una cama de partículas idénticas genera fuerzas de arrastre  $F_D$  y levamiento  $F_L$  que intentan moverla fuera de su lugar de reposo, donde el peso  $W$  de la partícula la mantiene en su lugar y se opone a la fuerza de levamiento y arrastre, ver figura 3.2.1. El punto donde las fuerzas se encuentran en equilibrio y se vuelve efectivo el transporte de la partícula por levantamiento o rodamiento y deslizamiento se describe mediante la suma de las fuerzas como:

$$F_D l_D + F_L l_L - W l_w = 0 \quad \text{Ec. 3.2.1}$$

Donde  $l_D$ ,  $l_l$  y  $l_W$  son las distancias de actuación o brazos de palanca de la fuerza de arrastre, levantamiento y peso sobre el punto  $P$ . La fuerza de arrastre es definida como:

$$F_D = \frac{\pi}{8} d_p^2 C_D \rho u^2 \quad \text{Ec. 3.1.5}$$

Duan [17] propone un coeficiente de arrastre para una esfera sometida a una corriente de flujo de un fluido no newtoniano en función del índice de comportamiento del fluido y el número de Reynolds de la partícula. Es definido como:

$$R_{ep} < 0.2(2^n) \quad C_D = \frac{24}{R_{ep}} (2-n) \quad \text{Ec. 3.2.2}$$

$$0.2(2^n) \leq R_{ep} < 24(2^n) \quad C_D = \frac{35.2}{\left(\frac{R_{ep}}{2^n}\right)^{1.03}} + n \left( 1 - \frac{20.9}{\left(\frac{R_{ep}}{2^n}\right)^{1.11}} \right) \quad \text{Ec. 3.2.3}$$

$$24(2^n) \leq R_{ep} \leq 100(2^n) \quad C_D = \frac{37}{\left(\frac{R_{ep}}{2^n}\right)^{1.1}} + 0.25 + 0.36n \quad \text{Ec. 3.2.4}$$

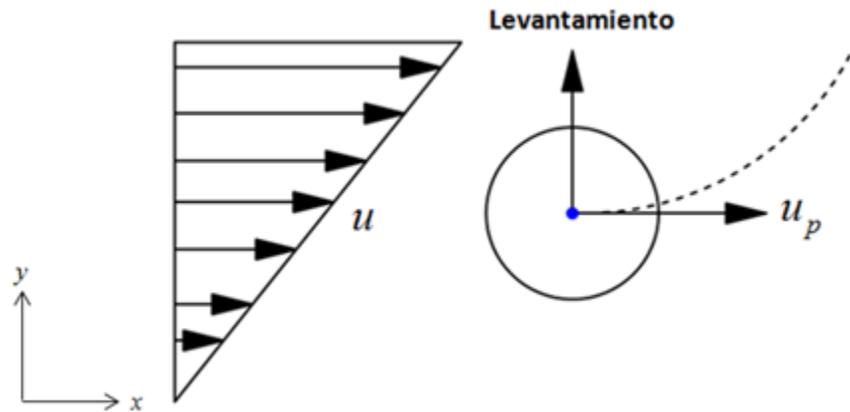


Figura 3.2.2 Efecto de levantamiento de una esfera sometida a una corriente de flujo

Por otro lado, la fuerza de levantamiento para una partícula esférica se define como:

$$F_L = \frac{\pi}{8} d_p^2 C_L \rho u^2 \quad \text{Ec. 3.2.5}$$

Donde  $C_L$  es el coeficiente de levantamiento. Duan [17] propone un coeficiente de levantamiento para una esfera sometida a una corriente de flujo en función del número de

Reynolds, diámetro de la partícula y el gradiente  $\frac{du}{dy}$  de la velocidad del fluido  $u$ , véase figura 3.2.2. Es definido como:

$$C_L = 2.47 \sqrt{\frac{d_p}{\text{Re}_p} \frac{du}{dy}} \quad \text{Ec. 3.2.6}$$

El número de Reynolds de una esfera sometida a una corriente de flujo está dado por [17]:

$$\text{Re}_p = \frac{\rho_f u^{2-n} d_p^n}{K} \quad \text{Ec. 3.2.7}$$

### 3.3 DISPERSIÓN

La distribución de las partículas transportadas en suspensión por el fluido es tomada en cuenta mediante una ecuación de balance de masa [6] como:

$$\frac{dc}{dt} + \nabla \cdot \vec{j}_p = 0 \quad \text{Ec. 3.3.1}$$

Donde  $t$  es el tiempo,  $c$  es la concentración de las partículas y  $\nabla \cdot \vec{j}$  es el flujo total de las partículas. El flujo total de la partícula cubre principalmente dos tipos de movimiento; el primero, es el flujo difusivo de las partículas y es aproximada por la ley de Fick como:

$$\vec{j}_{\text{Difusión}} = -D\nabla c \quad \text{Ec. 3.3.2}$$

Donde  $D$  es el coeficiente de difusividad. Y segundo, el flujo advectivo definido como:

$$\vec{j}_{\text{Advectivo}} = \vec{v}c \quad \text{Ec. 3.3.3}$$

Donde  $\vec{v}$  es la velocidad promedio de las partículas. Sustituyendo las ecuaciones 3.3.2 y 3.3.3 en 3.3.1 obtenemos:

$$\frac{dc}{dt} + \nabla \cdot [-D\nabla c + \vec{v}c] = 0 \quad \text{Ec. 3.3.4}$$

En un flujo de suspensión, el desplazamiento de las partículas son controladas generalmente por grandes procesos de difusión turbulenta. El movimiento hacia arriba de las partículas es contrarrestado por la fuerza gravitacional, lo que causa que las partículas se asienten en el fondo del canal. Para tomar en cuenta la difusión turbulenta de las partículas en la ecuación, el coeficiente de difusión browniano  $\varepsilon_p$  es introducido y considerando un estado estacionario [6] finalmente obtenemos:

$$\nabla[-\varepsilon_p \nabla c + \bar{v}c] = 0 \quad \text{Ec. 3.3.5}$$

La concentración de la partícula generalmente muestra una distribución en dirección vertical  $y$  respecto al flujo en cualquier transporte en un canal inclinado [6]. Asumiendo una velocidad de asentamiento constante, que es independiente de la posición, la ecuación gobernante es:

$$-v_{ht} \frac{dc}{dy} - \varepsilon_p \frac{d^2c}{dy^2} = 0 \quad \text{Ec. 3.3.6}$$

Donde  $v_{ht}$  es la componente en  $y$  de la velocidad terminal de asentamiento obstaculizada, donde el signo negativo significa que va en contra de la velocidad de suspensión de la partícula y  $c$  es la concentración de partículas a una distancia  $y$  del canal que las transporta. Doron [8,9] propone usar el coeficiente de difusividad dado por la correlación de Taylor [17] como:

$$\varepsilon_p = 0.052 \left( \bar{u} \sqrt{\frac{f}{2}} \right) r_h \quad \text{Ec. 3.3.7}$$

Donde  $\bar{u}$  es la velocidad promedio de flujo en canal de radio hidráulico  $r_h$ .  $f$  Es el factor de fricción entre el fluido y el canal en que se transporta.

El análisis del mecanismo de transporte de las partículas sólidas sumergidas en la corriente de un fluido nos permite comprender de forma general la dinámica de los recortes generados por la barrena al perforar un pozo direccional en función de la velocidad a la que esta se asienta y la velocidad promedio en el espacio anular del fluido circulante. Éstos parámetros de velocidad causan que los recortes se dispersen en el área transversal del pozo y que, a ciertas condiciones de flujo y características físicas del medio, se acumulen en el fondo de pozo formando una cama de sólidos estacionaria.

# **CAPITULO 4**

## **4. DESARROLLO DEL MODELO**

A partir de la base teórica vista en el capítulo anterior, en el presente capítulo se describe el desarrollo de las ecuaciones necesarias para predecir el espesor de la cama de sólidos estacionaria generada en el espacio anular en un pozo direccional.

En este capítulo, primero se desarrollan las ecuaciones geométricas para calcular las áreas de las capas de flujo en el espacio anular para los casos de dos y tres capas. También se calcula, mediante el modelo geométrico, los perímetros de contacto entre capas y las paredes del pozo. Posteriormente se desarrollan las ecuaciones de balance de masa y fuerza para la fase sólida y líquida con el fin obtener las ecuaciones fundamentales que describen el modelo. Posteriormente, se soluciona la ecuación de difusión y advección sobre el área de la capa de flujo de sólidos en suspensión para obtener la concentración de sólidos promedio en esta capa. Y por último, se desarrolla la solución de las ecuaciones fundamentales para obtener el espesor de la cama de sólidos estacionaria.

Las siguientes hipótesis se han considerado para el desarrollo y simplificación del modelo [6, 8, 9, 10,19]:

- Fluido incompresible en dos fases sólido y líquido
- Flujo independiente del tiempo
- La forma y tamaño de los recortes se considera uniforme
- Reología y densidad de las fases es constante
- Fluido no newtoniano que sigue la ley de potencia
- No existe resbalamiento entre la partícula sólida y líquida
- Proceso isotérmico

### **4.1 ECUACIONES DE LA GEOMETRÍA**

Los parámetros hidrodinámicos importantes son las áreas que ocupan en el espacio anular del pozo la cama de sólidos estacionaria y la capa de flujo de sólidos en suspensión a cierta velocidad de flujo y propiedades físicas del medio [19]. Es necesario definir las relaciones geométricas de excentricidad, diámetro de agujero o tubería de revestimiento y de la tubería interna (sarta de perforación) con las alturas y áreas de las capas. Por lo que definimos la ecuación de circunferencia para la tubería externa e interna con el sistema coordenado fuera del origen. Para el diámetro externo tenemos:

$$f(y) = 2\left(\sqrt{2r_e - y}\sqrt{y}\right)$$

**Ec. 4.1.1**

Para el diámetro interno definimos:

$$f(y) = 2\sqrt{-e_e^2 + r_i^2 + 2e_e y - y^2} \quad \text{Ec. 4.1.2}$$

Donde  $r_e$  y  $r_i$  es el radio de la circunferencia externa e interna respectivamente y  $e_e$  es la distancia del centro de la circunferencia interna al eje  $x$ , véase la figura 4.1.1. Para obtener las áreas de cada una de las capas debemos de integrar las ecuaciones 4.1.1 y 4.1.2 con los límites pertinentes a cada capa y restarle las áreas calculadas en el diámetro interno para considerar el espacio anular. Para el área de flujo en suspensión  $a_1$  tenemos entonces:

$$a_1 = 2 \left( \int_{y_2+y_3}^{d_e} \sqrt{2r_e - y} \sqrt{y} dy - \int_{y_2+y_3}^{d_i} \sqrt{-e_e^2 + r_i^2 + 2e_e y - y^2} dy \right) \quad \text{Ec. 4.1.3}$$

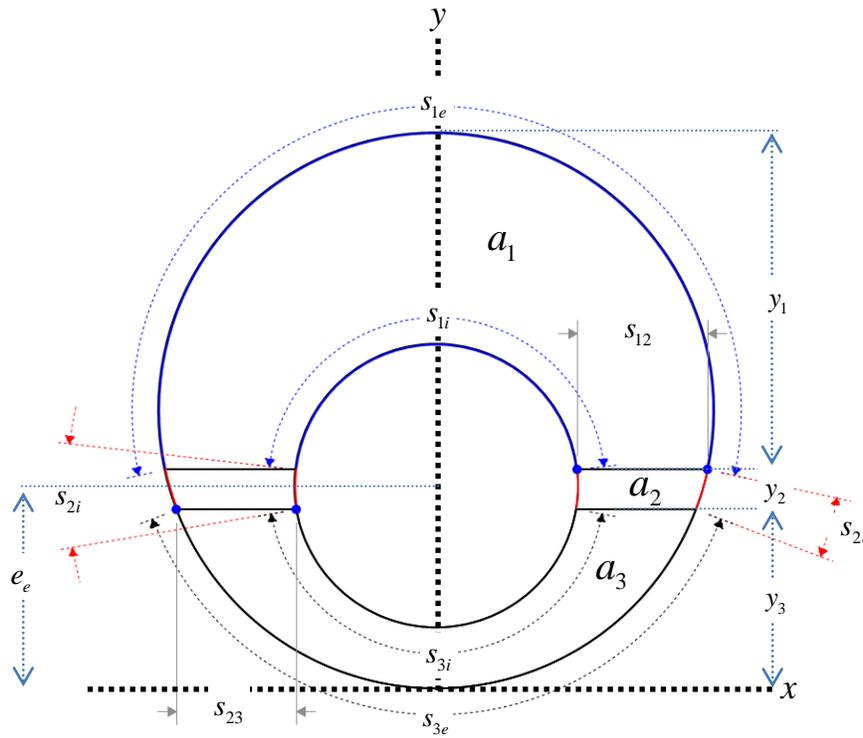


Figura 4.1.1 Parámetros que definen el modelo geométrico en tres capas.

El área de la cama estacionaria  $a_3$  es definida como:

$$a_3 = 2 \left( \int_0^{y_3} \sqrt{2r_e - y} \sqrt{y} dy - \int_0^{y_3} \sqrt{-e_e^2 + r_i^2 + 2e_e y - y^2} dy \right) \quad \text{Ec. 4.1.4}$$

Teniendo ya definida dos áreas, el área de la capa dos  $a_2$  se obtiene mediante la relación:

$$a_2 = a_a - (a_1 + a_3) \quad \text{Ec. 4.1.5}$$

Donde  $a_a$  es el área total anular. Para obtener los perímetros de contacto entre capas y las paredes del pozo, es necesario integrar la función de longitud de arco, ecuación 4.1.6. Tal como se hizo para obtener las áreas.

$$s(y) = 2 \sqrt{1 + \left( \frac{df(y)}{dy} \right)^2} \quad \text{Ec. 4.1.6}$$

Donde la derivada de la ecuación 4.1.1 para el diámetro exterior es:

$$\frac{df(y)}{dy} = \frac{r_e - y}{\sqrt{2r_e - y} \sqrt{y}} \quad \text{Ec. 4.1.7}$$

Y la derivada de la ecuación 4.1.2 para el diámetro interno está dado por:

$$\frac{df(y)}{dy} = \frac{e_e - y}{\sqrt{-(e_e - r_i - y)(e_e + r - y)}} \quad \text{Ec. 4.1.8}$$

Sustituyendo las derivadas dentro de la ecuación de longitud de arco e integrando con los límites de cada capa, obtenemos el perímetro de contacto entre el flujo de sólidos en suspensión y la pared del pozo:

$$s_{1e} = 2 \int_{y_2+y_3}^{d_e} \sqrt{\frac{r_e^2}{2r_e y - y^2}} dy \quad \text{Ec. 4.1.9}$$

Y el contacto con la pared del tubo interno está definido por:

$$s_{1i} = 2 \int_{y_2+y_3}^{d_i} \sqrt{\frac{r_i^2}{(e_e + r_i - y)(-e_e + r_i + y)}} dy \quad \text{Ec. 4.1.10}$$

El perímetro de contacto entre la capa de cama de sólidos estacionaria y la pared del pozo está dada por:

$$s_{3e} = 2 \int_0^{y_3} \sqrt{\frac{r_e^2}{2r_e y - y^2}} dy \quad \text{Ec. 4.1.11}$$

Por otro lado, el contacto de ésta capa con la pared de la tubería interna se define como:

$$s_{3i} = 2 \int_0^{y_3} \sqrt{\frac{r_i^2}{(e_e + r_i - y)(-e_e + r_i + y)}} dy \quad \text{Ec. 4.1.12}$$

Ya habiendo obtenido los perímetros de contacto de las capas de flujo en suspensión y la cama estacionaria, podemos calcular el perímetro de contacto entre la capa de cama de sólidos móvil y la pared del pozo mediante la relación:

$$s_{2e} = s_e - (s_{1e} + s_{3e}) \quad \text{Ec. 4.1.13}$$

Y para el contacto con la tubería interna se tiene la relación:

$$s_{2i} = s_i - (s_{1i} + s_{3i}) \quad \text{Ec. 4.1.14}$$

Donde  $s_e$  es el diámetro de la pared del pozo o tubería exterior y  $s_i$  es el diámetro de la tubería interna. Por otro lado, el perímetro de contacto entre la capa de flujo en suspensión y la capa de cama de sólidos móvil está dado por la ecuación:

$$s_{12} = \left( \sqrt{8r_e(y_2 + y_3) - 4(y_2 + y_3)^2} \right) - \left( 2\sqrt{-e_e^2 + r_i^2 + 2e_e(y_2 + y_3) - (y_2 + y_3)^2} \right) \quad \text{Ec. 4.1.15}$$

Para el perímetro de contacto entre la capa de cama de sólidos móvil y la cama estacionaria definimos:

$$s_{23} = \left( \sqrt{8r_e(y_3) - 4(y_3)^2} \right) - \left( 2\sqrt{-e_e^2 + r_i^2 + 2e_e(y_3) - (y_3)^2} \right) \quad \text{Ec. 4.1.16}$$

Teniendo ya definidos los perímetros de contacto del flujo y el medio en el que circula, calculamos el diámetro hidráulico para estudiar el flujo de las capas en el espacio anular como si tuviesen forma cilíndrica, esta se define como:

$$d_h = \frac{4a}{\sum s} \quad \text{Ec. 4.1.17}$$

Donde  $\sum s$  es el perímetro de la capa con área transversal  $a$ . Para la capa de flujo en suspensión se define:

$$d_{h1} = \frac{4a_1}{(s_{1e} + s_{1i} + s_{12})} \quad \text{Ec. 4.1.18}$$

Para la capa de cama de sólidos móvil, se define:

$$d_{h2} = \frac{4a_2}{(s_{2e} + s_{2i} + s_{12} + s_{23})} \quad \text{Ec. 4.1.19}$$

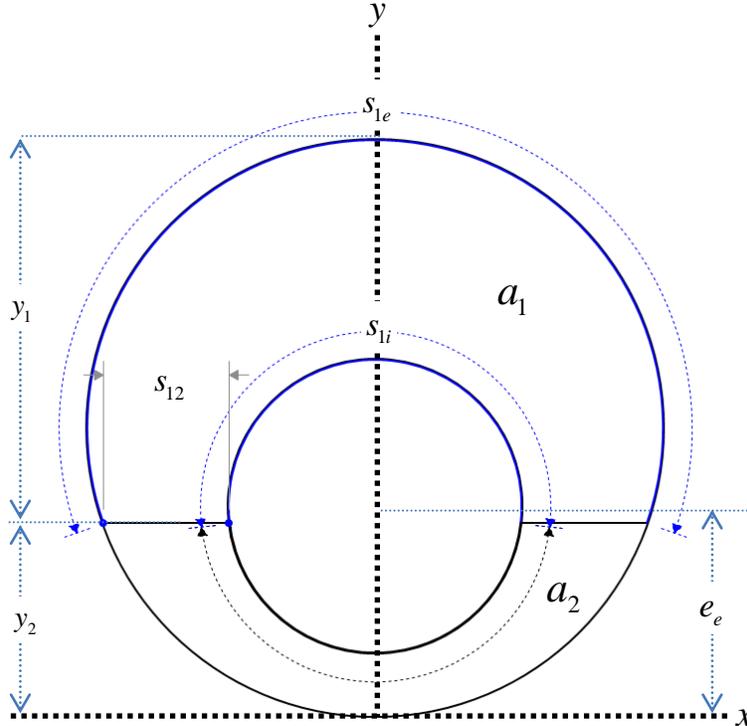


Figura 4.1.2 Parámetros que definen el modelo geométrico en dos capas.

Para el modelo de dos capas no es considerado el espesor de la cama móvil, por lo que solo existe la cama estacionaria y la capa de flujo en suspensión, véase figura 4.1.2. Por lo tanto calculamos el área de la capa de flujo en suspensión cambiando los límites de integración como:

$$a_1 = 2 \left( \int_{y_2}^{d_e} \sqrt{2r_e - y} \sqrt{y} dy - \int_{y_2}^{d_i} \sqrt{-e_e^2 + r_i^2 + 2e_e y - y^2} dy \right) \quad \text{Ec. 4.1.20}$$

Donde en este caso  $y_2$  se refiere al espesor de la cama estacionaria. Los perímetros de contacto de la capa de flujo en suspensión y la pared externa se define como:

$$s_{1e} = 2 \int_{y_2}^{d_e} \sqrt{\frac{r_e^2}{2r_e y - y^2}} dy \quad \text{Ec. 4.1.21}$$

Y el perímetro de contacto con la pared interna tenemos:

$$s_{1i} = 2 \int_{y_2}^{d_i} \sqrt{\frac{r_i^2}{(e_e + r_i - y)(-e_e + r_i + y)}} dy \quad \text{Ec. 4.1.22}$$

Para el perímetro de contacto entre la capa de flujo en suspensión y la cama estacionaria definimos:

$$s_{12} = \left( \sqrt{8r_e(y_2) - 4(y_2)^2} \right) - \left( 2 \cdot \sqrt{-e_e^2 + r_i^2 + 2e_e(y_2) - (y_2)^2} \right) \quad \text{Ec. 4.1.23}$$

Finalmente, el diámetro hidráulico de la capa de flujo en suspensión queda definida como:

$$d_{h1} = \frac{4a_1}{(s_{1e} + s_{1i} + s_{12})} \quad \text{Ec. 4.1.24}$$

## 4.2 ECUACIONES DEL BALANCE DE MASA Y FUERZA

Consideramos que el flujo bifásico sólido y líquido circula dentro de un sistema cerrado por lo que la materia se conserva. El flujo másico para la fase sólida es definida como:

$$\dot{m} = \rho_p u c a \quad \text{Ec. 4.2.1}$$

Y para la fase líquida

$$\dot{m} = \rho_f u (1 - c) a \quad \text{Ec. 4.2.2}$$

Donde  $\rho_p$  y  $\rho_f$  es la densidad de la fase sólida y líquida respectivamente,  $u$  es la velocidad de flujo,  $c$  es la concentración de sólidos y  $a$  es el área transversal donde circula la materia.

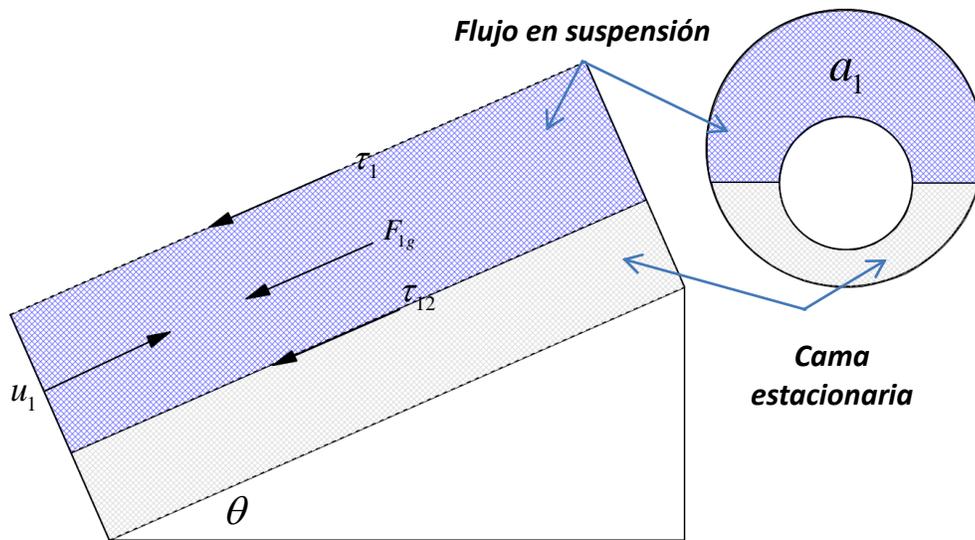


Fig. 4.2.1 Patrón de flujo en dos capas

El balance de masa para el flujo en dos capas, ver figura 4.2.1. Es definida mediante la relación:

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_T \quad \text{Ec. 4.2.3}$$

Donde  $\dot{m}_1$  y  $\dot{m}_2$  es el flujo másico de la capa de flujo en suspensión y la cama estacionaria respectivamente y  $\dot{m}_T$  es el flujo másico total. Por lo tanto para la fase sólida tenemos:

$$\rho_p u_1 c_1 a_1 + \rho_p u_2 c_2 a_2 = \rho_p u_a c_a a_a \quad \text{Ec. 4.2.4}$$

Considerando que la cama es estacionaria, entonces  $u_2 = 0$ . Por lo que finalmente obtenemos:

$$u_1 c_1 a_1 = u_a c_a a_a \quad \text{Ec. 4.2.5}$$

Donde  $u_1$  es la velocidad de la capa de flujo de sólidos en suspensión a una concentración promedio  $c_1$ . El balance de masa para la fase líquida es definida como:

$$u_1 (1 - c_1) a_1 + u_2 (1 - c_2) a_2 = u_a (1 - c_a) a_a \quad \text{Ec. 4.2.6}$$

Considerando  $u_2 = 0$  obtenemos:

$$u_1 (1 - c_1) a_1 = u_a (1 - c_a) a_a \quad \text{Ec. 4.2.7}$$

La concentración total de recortes en el espacio anular  $c_a$  es calculada mediante la relación de la masa sólida desplazada por la barrena al perforar y la masa sólida transportada por el fluido de perforación. Por lo tanto definimos:

$$\rho_p u_{rop} a_{bit} = \rho_p u_a a_a c_a \quad \text{Ec. 4.2.8}$$

Donde  $u_{rop}$  es la velocidad de penetración de la barrena en la formación y  $a_{bit}$  es el área transversal de la barrena. Simplificando y resolviendo para  $c_a$  obtenemos:

$$c_a = \frac{u_{rop} a_{bit}}{u_a a_a} \quad \text{Ec. 4.2.9}$$

Si

$$u_a a_a = Q_{Total} = Q_{fluido} + Q_{sólidos} = Q_{fluido} + u_{rop} a_{bit} \quad \text{Ec. 4.2.10}$$

Finalmente obtenemos la concentración total de sólidos en el espacio anular en función de la velocidad de penetración de la barrena, área transversal de la barrena y el gasto volumétrico de fluido de perforación  $Q_f$ . Definida por:

$$c_a = \frac{u_{rop} (a_{bit})}{Q_f + (u_{rop} (a_{bit}))} \quad \text{Ec. 4.2.11}$$

La velocidad promedio anular del fluido de perforación  $u_a$  se obtenida mediante la relación:

$$\rho_f u_a a_a = \rho_f u_a a_a (1 - c_a) = \rho_f Q_f \quad \text{Ec. 4.2.12}$$

Simplificando y resolviendo para  $u_a$

$$u_a = \frac{Q_f}{a_a (1 - c_a)} \quad \text{Ec. 4.2.13}$$

Por otro lado, las ecuaciones de movimiento provienen de aplicar la segunda ley de newton al sistema, y es definido como:

$$\frac{d(\rho \vec{u})}{dt} = F_{net} \quad \text{Ec. 4.2.14}$$

Donde  $\rho$  es la densidad del sistema moviéndose a una velocidad  $\vec{u}$  a un tiempo  $t$ ,  $F_{net}$  es la fuerza resultante. Al considerar un flujo permanente independiente del tiempo obtenemos:

$$F_{net} = 0$$

Por lo que la ecuación de movimiento se reduce a un análisis de fuerzas en el sistema, véase figura 4.2.1. La suma de las fuerzas del flujo sólido y líquido en dos capas en estado estacionario es definida como:

$$-a_1 \frac{dP}{dL} - \tau_1 (s_{1e} + s_{1i}) - \tau_{12} s_{12} - F_{1g} = 0 \quad \text{Ec. 4.2.15}$$

Donde  $\frac{dP}{dL}$  es el gradiente de presión en el sistema,  $s$  son los perímetros de contacto calculados en el apartado 4.1 y donde actúan los esfuerzos de corte  $\tau$ , ver figura 4.2.1.  $F_{1g}$  Es la fuerza de gravedad sobre la capa de flujo en suspensión debido a la inclinación del pozo y es definida como:

$$F_{1g} = \rho_1 g a_1 \sin \theta \quad \text{Ec. 4.2.16}$$

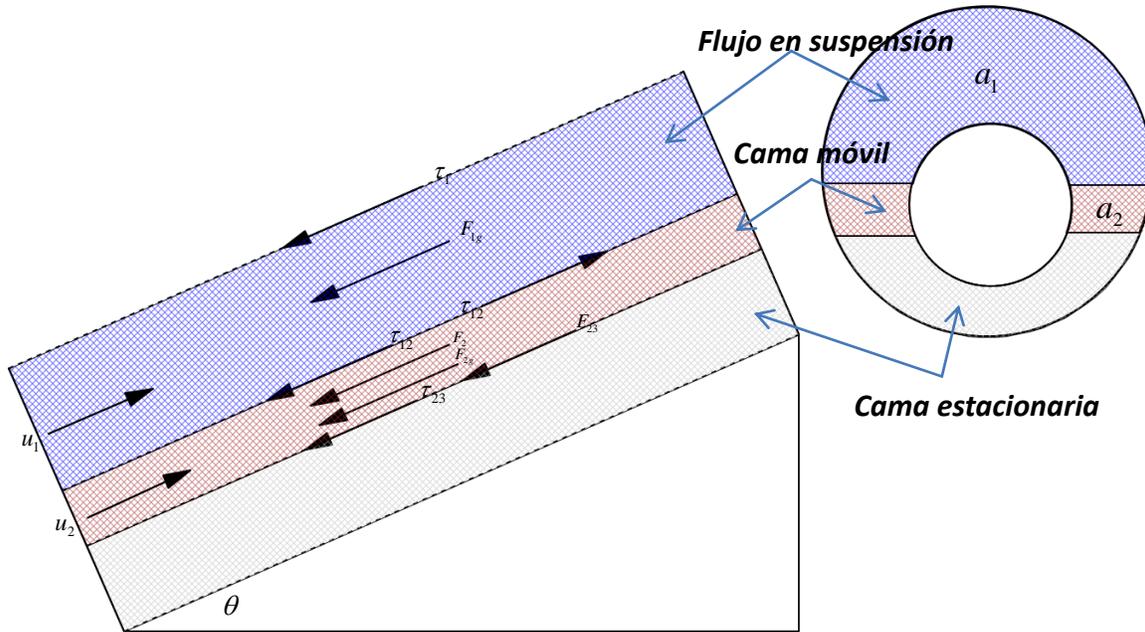
Para el flujo en tres capas, véase figura 4.2.2, El balance de masa para la fase sólida es:

$$u_1 c_1 a_1 + u_2 c_2 a_2 + u_3 c_3 a_3 = u_a c_a a_a \quad \text{Ec. 4.2.17}$$

Donde  $u_2$  es la velocidad de la capa de flujo en cama de sólidos móvil y  $c_2$  es la concentración de sólidos en esta capa. Considerando que existe también una cama de sólidos en el fondo del pozo y que es estacionaria  $u_3 = 0$ , la ecuación 4.1.17 se reduce a:

$$u_1 c_1 a_1 + u_2 c_2 a_2 = u_a c_a a_a$$

Ec. 4.2.18



#### 4.2.4 Patrón de flujo en tres capas

El balance de masa para la fase líquida es definida como:

$$u_1(1-c_1)a_1 + u_2(1-c_2)a_2 + u_3(1-c_3)a_3 = u_a(1-c_a)a_a$$

Ec. 4.2.19

Considerando la cama de sólidos estacionaria  $u_3 = 0$ , la ecuación 4.2.19. Se reduce a:

$$u_1(1-c_1)a_1 + u_2(1-c_2)a_2 = u_a(1-c_a)a_a$$

Ec. 4.2.20

La suma de las fuerzas del flujo sólido y líquido, ver figura 4.2.2, en estado estacionario para la capa de flujo en suspensión es definida como:

$$-a_1 \frac{dP}{dL} - \tau_1(s_{1e} + s_{1i}) - \tau_{12}s_{12} - F_{1g} = 0$$

Ec. 4.2.21

La suma de fuerzas para la capa de cama móvil obtenemos:

$$-a_2 \frac{dP}{dL} + \tau_{12}s_{12} - \tau_2(s_{2e} + s_{2i}) - \tau_{23}s_{23} - F_2 - F_{23} - F_{2g} = 0$$

Ec. 4.2.22

Donde  $\frac{dP}{dL}$  es el gradiente de presión,  $s$  son los perímetros de contacto, calculados en el apartado 4.1 y donde actúan los esfuerzos de corte  $\tau$ , ver figura 4.2.2.  $F_2$  y  $F_{23}$  son las

fuerzas de fricción seca de la capa de cama de sólidos móvil con la pared del pozo y la interface con la cama estacionaria respectivamente [8,19].  $F_{2g}$  Es la fuerza de gravedad sobre la capa de cama de sólidos móvil debido a la inclinación del pozo y es definida como:

$$F_{2g} = \rho_2 g a_2 \sin \theta \quad \text{Ec. 4.2.23}$$

El esfuerzo de corte entre el flujo en suspensión y la tubería externa e interna está dado por [8]:

$$\tau_1 = \frac{1}{2} \rho_1 |u_1| u_1 f_1 \quad \text{Ec. 4.2.24}$$

Donde  $f_1$  es el factor de fricción intersticial entre el flujo y la pared del pozo o tubería externa. El factor de fricción es calculado utilizando la correlación de Darby [20] y es definida como:

$$f_1 = (1 - \alpha_1) f_{1lam} + \frac{\alpha_1}{(f_{1Turb}^{-8} + f_{1Trans}^{-8})^{1/8}} \quad \text{Ec. 4.2.25}$$

Donde  $\alpha_1$  es un parámetro que define al número de Reynolds crítico a la cual el flujo laminar cesa, y está dado por:

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + 4^{-(Re_1 - (2100 + 875(1-n)))}} \quad \text{Ec. 4.2.26}$$

Donde  $n$  es el índice de comportamiento del fluido ley de potencia. El factor de fricción que define el flujo laminar en la ecuación 4.2.25 es:

$$f_{1lam} = \frac{16}{Re_1} \quad \text{Ec. 4.2.27}$$

Para flujo turbulento:

$$f_{1turb} = \frac{0.0682n^{-\frac{1}{2}}}{Re_1^{(1.87+2.39n)}} \quad \text{Ec. 4.2.28}$$

Para flujo en transición:

$$f_{1trans} = 1.79 \times 10^{-4} \exp[-5.24n] Re_1^{0.414+0.757n} \quad \text{Ec. 4.2.29}$$

Donde el número de Reynolds  $Re_1$  para fluidos ley de potencia en la capa de flujo en suspensión es dado por [20]:

$$\text{Re}_1 = \frac{\rho_1 d_{h1}^n |u_1|^{2-n}}{8^{n-1} k \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^n} \quad \text{Ec. 4.2.30}$$

Donde  $d_{h1}$  es el diámetro hidráulico de la capa de flujo en suspensión definido en el apartado 4.1, la densidad de la suspensión es calculada como [8]:

$$\rho_1 = \rho_p c_1 + \rho_f (1 - c_1) \quad \text{Ec. 4.2.31}$$

El esfuerzo de corte interfacial entre la capa de flujo en suspensión y la cama móvil está dado por:

$$\tau_{12} = \frac{1}{2} \rho_1 |u_1 - u_2| (u_1 - u_2) f_{12} \quad \text{Ec. 4.2.32}$$

El factor de fricción interfacial está dado por la correlación de Reed y Pilehvari [21] y es multiplicado por dos para contar la depositación y entrada de partículas a la interface, Ramadan [22] y se define como:

$$\frac{1}{\sqrt{2f_{12}}} = -4 \log \left[ \frac{0.27 \varepsilon}{d_{h1}} + \frac{1.26^{n-1.2}}{\left( \text{Re}_{12} 2 f_{12}^{1-\frac{n}{2}} \right)^{n-0.75}} \right] \quad \text{Ec. 4.2.33}$$

Donde  $\varepsilon_p$  es la rugosidad de la cama de sólidos. El número de Reynolds relativo [23] para fluidos ley de potencia en la interface es calculado como:

$$\text{Re}_{12} = \frac{\rho_1 d_{h1}^n |u_1 - u_2|^{2-n}}{8^{n-1} k \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^n} \quad \text{Ec. 4.2.34}$$

Por otro lado, el esfuerzo de corte entre la cama móvil y la tubería externa e interna está dado por [8]:

$$\tau_2 = \frac{1}{2} \rho_2 |u_2| u_2 f_2 \quad \text{Ec. 4.2.35}$$

Donde  $f_2$  es el factor de fricción intersticial entre el flujo y la pared. Es calculado también con las ecuaciones 4.2.25 a 4.2.29 pero con el número de Reynolds de la cama de sólidos móvil que se define como:

$$\text{Re}_2 = \frac{\rho_2 d_{h2}^n |u_2|^{2-n}}{8^{n-1} k \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^n} \quad \text{Ec. 4.2.36}$$

El diámetro hidráulico  $d_{h2}$  de la capa de cama de sólidos móvil es definido en el apartado 4.1. La densidad de la mezcla en esta capa se define como [8]:

$$\rho_2 = \rho_p c_2 + \rho_f (1 - c_2) \quad \text{Ec. 4.2.37}$$

El esfuerzo de corte interfacial entre la capa de cama móvil y la cama estacionaria es calculado con [8]:

$$\tau_{23} = \frac{1}{2} \rho_2 |u_2| u_2 f_{23} \quad \text{Ec. 4.2.38}$$

El factor de fricción  $f_{23}$  es calculado con la ecuación 4.2.33 pero con el número de Reynolds de la cama de sólidos móvil, ecuación 4.2.36. Ramadán [22] proponen que no es necesario multiplicar a  $f_{23}$  por dos, ya que la fuerza de fricción seca  $F_{23}$  se encarga de esta corrección. La fuerza de fricción seca sobre la pared del pozo  $F_2$  es ocasionada por el movimiento la cama móvil de sólidos y está compuesta por los efectos del peso flotado de las partículas  $F_{w2}$  y la transmisión de esfuerzos desde la interface  $F_{\phi 2}$  [8], por lo tanto:

$$F_2 = F_{w2} + F_{\phi 2} \quad \text{Ec. 4.2.39}$$

$F_{w2}$  Es calculado usando una distribución de presión pseudo hidrostática que representa el peso flotado de las partículas, una aproximación aplicable a partículas cohesionadas [9]. Integrando está distribución a lo largo del perímetro de contacto entre la cama de sólidos móvil y la pared del pozo  $s_2$  obtenemos:

$$F_{w2} = 2\eta (\rho_s - \rho_p) g \cos \theta c_2 \int_{y_2}^{y_3} (y_3 + y_2 - y) \sqrt{\frac{r_e^2}{2r_e y - y^2}} dy \quad \text{Ec. 4.2.40}$$

Donde  $\eta$  es el coeficiente de fricción dinámica y en el presente estudio es usado un valor de 0.15 [20]. El otro esfuerzo adicional es el que se transmite a través de las partículas desde la interface. Bagnold [24] demostró que cuando un fluido fluye sobre un depósito de partículas sólidas, existe un esfuerzo normal en la interface que es asociado con el esfuerzo de corte generado por el fluido sobre la cama de sólidos. Esta relación para el contacto de la cama de sólidos móvil y la pared del pozo es:

$$F_{\phi 2} = \eta \frac{\tau_{12} S_2}{\tan \phi} \quad \text{Ec. 4.2.41}$$

Donde  $\phi$  es el ángulo de fricción interna y el valor de  $\tan \phi$  usado en este estudio es de 0.6 [18]. El esfuerzo de fricción seca en la interface de la cama de sólidos móvil y la cama estacionaria  $F_{23}$  es calculado de manera similar como:

$$F_{23} = F_{w23} + F_{\phi23} \quad \text{Ec. 4.2.42}$$

Donde el efecto del peso flotado de las partículas sobre la interface es definida como:

$$F_{w23} = \eta(\rho_s - \rho) g \cos \theta c_2 y_2 S_{23} \quad \text{Ec. 4.2.43}$$

Y la transmisión de esfuerzos desde la interface es definida como:

$$F_{\phi23} = \eta \frac{\tau_{12} S_{23}}{\tan \phi} \quad \text{Ec. 4.2.44}$$

### 4.3 ECUACIONES DE CONCENTRACIÓN PROMEDIO EN LA SUSPENSIÓN

La ecuación de difusión y advección, descrita en el apartado 3.3, define la dispersión de los sólidos a través del medio en que estos circulan en función de la concentración  $c$  de sólidos a una distancia vertical  $y$  del canal. Por lo tanto, para el análisis de flujo en capas del presente estudio, es necesario calcular la concentración promedio de recortes en la capa de flujo de sólidos en suspensión. La concentración en la capa de cama de sólidos móvil  $c_2$  y en la cama estacionaria  $c_3$  se considera constante con un valor de 0.52 [8,19].

A partir de la ecuación:

$$\varepsilon_p \frac{d^2 c}{dy^2} + v_{ht} \frac{dc}{dy} = 0 \quad \text{Ec. 4.3.1}$$

La concentración de los sólidos  $c$  varía en la distancia vertical  $y$  perpendicular a la dirección del flujo. Por lo tanto tenemos una solución para la ecuación 4.3.1 de la forma:

$$c(y) = \alpha e^{\beta y} \quad \text{Ec. 4.3.2}$$

Por otro lado, la concentración de sólidos en la interface de la capa de flujo en suspensión y la cama de sólidos es igual a la de la cama de sólidos, por lo que definimos una condición de frontera para el flujo en tres capas:

$$c(y_2 + y_3) = c_2 \quad \text{Ec. 4.3.3}$$

Y para el flujo en dos capas:

$$c(y_2) = c_2 \quad \text{Ec. 4.3.4}$$

Donde la concentración en la cama de sólidos móvil o estacionaria es conocida. Derivando la ecuación **4.3.2** obtenemos:

$$\frac{d}{dy} c(y) = \alpha \beta e^{\beta y} \quad \text{Ec. 4.3.5}$$

Y con la doble derivada tenemos

$$\frac{d^2}{dy^2} c(y) = \alpha \beta^2 e^{\beta y} \quad \text{Ec. 4.3.6}$$

De la sustitución de las ecuaciones **4.3.5** y **4.3.6** en **4.3.1** resulta:

$$v_{ht} \alpha \beta e^{\beta y} + \varepsilon_p \alpha \beta^2 e^{\beta y} = 0 \quad \text{Ec. 4.3.7}$$

Resolviendo  $\beta$  de la ecuación **4.3.7** obtenemos:

$$\beta = -\frac{v_{ht}}{\varepsilon_p} \quad \text{Ec. 4.3.8}$$

Sustituyendo la ecuación **4.3.8** en **4.3.2** tenemos:

$$c(y) = \alpha e^{-\frac{v_{ht}}{\varepsilon_p} y} \quad \text{Ec. 4.3.9}$$

Evaluando las ecuaciones **4.3.5** y **4.3.6** con la condición de frontera **Ec. 4.3.3** y resolviendo  $\alpha$  obtenemos para el flujo en tres capas:

$$\alpha = c_2 e^{\frac{v_{ht}}{\varepsilon_p} (y_2 + y_3)} \quad \text{Ec. 4.3.10}$$

Y para el flujo en dos capas:

$$\alpha = c_2 e^{\frac{v_{ht}}{\varepsilon_p} (y_2)} \quad \text{Ec. 4.3.11}$$

Sustituyendo las ecuaciones **4.3.10** y **4.3.11** en **Ec. 4.3.9**, obtenemos para el flujo de tres capas:

$$c(y) = c_2 e^{-\frac{v_{ht}}{\varepsilon_p} (y - (y_2 + y_3))} \quad \text{Ec. 4.3.12}$$

Para el flujo en dos capas:

$$c(y) = c_2 e^{-\frac{v_{ht}(y-y_2)}{\varepsilon_p}}$$

**Ec. 4.3.13**

Hasta el momento tenemos las ecuaciones **4.3.12** y **4.3.13** que describen la concentración de sólidos para el modelo de dos y tres capas en función de la distancia vertical  $y$  de la capa de sólidos en suspensión. Sin embargo, es necesario obtener la concentración promedio que existe en el área de la capa de flujo en suspensión  $c_1$ , por lo que Doron [8] propone integrar la ecuación de concentración sobre el área de la capa como:

$$a_1 c_1 = \iint_{y_1} c(y) a(y) dy$$

**Ec. 4.3.14**

Donde  $c(y)$  es definido con la ecuación **4.3.12** o **4.3.13** y  $a(y)$  es definido por la ecuación del área de la capa de flujo en suspensión **4.1.3**. Al despejar  $c_1$ , que es la concentración promedio en la capa de sólidos en suspensión, obtenemos:

$$c_1 = \frac{\iint_{a_1} c(y) dA}{a_1}$$

**Ec. 4.3.15**

Sustituyendo las **Ec. 4.3.12** y **Ec. 4.3.13** en **Ec. 4.3.15** obtenemos finalmente la concentración promedio en la capa de flujo en suspensión para el flujo en tres capas:

$$c_1 = 2 \int_{y_2+y_3}^{d_e} \frac{c_2 e^{-\frac{v_{ht}(y-(y_2+y_3))}{\varepsilon_p}} \left( \sqrt{2r_e - y} \sqrt{y} - \sqrt{-e_e^2 + r_i^2 + 2e_e y - y^2} \right) dy}{a_1}$$

**Ec. 4.3.16**

Y para el flujo en dos capas:

$$c_1 = 2 \int_{y_2}^{d_e} \frac{c_2 e^{-\frac{v_{ht}(y-y_2)}{\varepsilon_p}} \left( \sqrt{2r_e - y} \sqrt{y} - \sqrt{-e_e^2 + r_i^2 + 2e_e y - y^2} \right) dy}{a_1}$$

**Ec. 4.3.17**

#### 4.4 ECUACIÓN DE VELOCIDAD MÍNIMA DE LA CAMA DE SÓLIDOS MÓVIL

En la figura **4.4.1** observamos las relaciones geométricas de una partícula esférica reposando sobre una cama de partículas sólidas idénticas y sometidas al flujo de un fluido. Donde  $\theta$  es el ángulo de inclinación del pozo medido desde la horizontal y  $\varphi$  es el ángulo de reposo de la partícula. La sumatoria de momentos sobre el punto  $P$  para el rodamiento de la partícula es definida como [25]:

$$F_D z_1 + F_L z_0 - W z_2 = 0$$

**Ec. 4.4.1**

Sustituyendo las definiciones de las fuerzas de levantamiento  $F_L$ , arrastre  $F_D$  y el peso neto  $W$  vistas en el apartado 3.1 y las distancias de actuación, véase la figura 4.4.1, en la ecuación 4.4.1 obtenemos:

$$\frac{\pi}{8} d_p^2 C_D \rho u_2^2 (r_p \cos \varphi) + \frac{\pi}{8} d_p^2 C_L \rho u_2^2 (r_p \sin \varphi) - \frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_s - \rho) g (r_p \sin(\theta + \varphi)) = 0 \quad \text{Ec. 4.4.2}$$

Resolviendo  $u_2$  de la ecuación 4.4.2 y simplificando obtenemos:

$$u_2 = \sqrt{\frac{4d_p(s-1)g \sin(\theta + \varphi)}{3(C_D \cos \varphi + C_L \sin \varphi)}} \quad \text{Ec. 4.4.3}$$

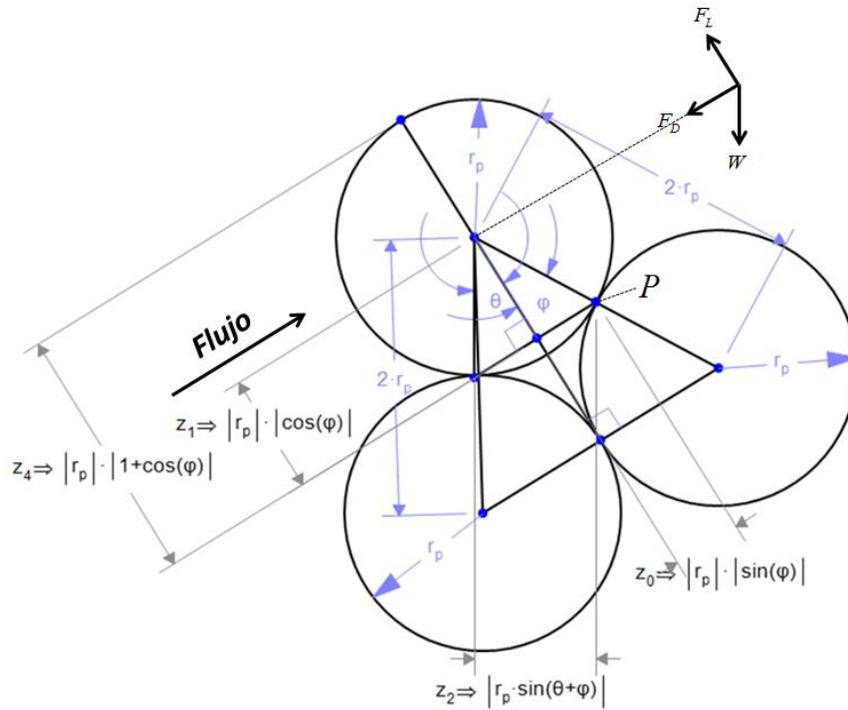


Figura. 4.4.1 Análisis geométrico de la cama de sólidos.

El número promedio de las partículas de las que hay que considerar su peso debido al espesor de la cama de sólidos móvil [8] está dado por:

$$N_p = c_2 \left( \frac{y_2 - d_p}{d_p} \right) + 1 \quad \text{Ec. 4.4.4}$$

Introduciendo  $N_p$  en la ecuación 4.4.3 obtenemos finalmente la velocidad mínima de la cama de sólidos móvil:

$$u_2 = \sqrt{\frac{4d_p(s-1)g\left(c_2\left(\frac{y_2-d_p}{d_p}\right)+1\right)\sin(\theta+\varphi)}{3(C_D \cos \varphi + C_L \sin \varphi)}} \quad \text{Ec. 4.4.5}$$

#### 4.5 SOLUCIÓN

El patrón de flujo en dos capas es descrito por el sistema de cuatro ecuaciones:

$$u_1 c_1 a_1 = u_a c_a a_a \quad \text{Ec. 4.5.1}$$

$$u_1(1-c_1)a_1 = u_a c_a a_a \quad \text{Ec. 4.5.2}$$

$$-a_1 \frac{dP}{dL} - \tau_1(s_{1e} + s_{1i}) - \tau_{12}s_{12} - F_{1g} = 0 \quad \text{Ec. 4.5.3}$$

$$c_1 = 2 \int_{y_2}^{d_e} \frac{c_2 e^{-\frac{v_{ht}(y-y_2)}{\varepsilon_p}} \left( \sqrt{2r_e - y} \sqrt{y} - \sqrt{-e_e^2 + r_i^2 + 2e_e y - y^2} \right) dy}{a_1} \quad \text{Ec. 4.5.4}$$

Con las incógnitas  $y_2$ ,  $c_1$ ,  $u_1$  y  $\frac{dP}{dL}$ . Resolviendo las ecuaciones **4.5.1** y **4.5.2** para la velocidad y concentración promedio de la capa de flujo de sólidos en suspensión  $u_1$  y  $c_1$  respectivamente, obtenemos:

$$u_1 = \frac{a_a u_a}{a_1} \quad \text{Ec. 4.5.5}$$

Y

$$c_1 = c_a \quad \text{Ec. 4.5.6}$$

La ecuación **4.5.5** y **4.5.6** son función de la incógnita  $y_2$  y de parámetros de operación, véase la ecuación **4.2.11** y **4.2.13**. Finalmente, el espesor de la cama de sólidos estacionaria  $y_2$  puede ser calculado mediante la ecuación **4.5.4**. La velocidad de asentamiento obstaculizado de la partícula  $v_{ht}$  es calculada con las ecuaciones **3.1.13** y **3.1.14**. El coeficiente de difusividad  $\varepsilon_p$  es determinado por la ecuación **3.3.7**, para la capa de flujo de sólidos en suspensión se define como:

$$\varepsilon_p = 0.052 \left( u_1 \sqrt{\frac{f_1}{2}} \right) \frac{d_{h1}}{2} \quad \text{Ec. 4.5.7}$$

El patrón de flujo en tres capas es descrito por el sistema de seis ecuaciones:

$$u_1 c_1 a_1 + u_2 c_2 a_2 = u_a c_a a_a \quad \text{Ec. 4.5.8}$$

$$u_1 (1 - c_1) a_1 + u_2 (1 - c_2) a_2 = u_a c_a a_a \quad \text{Ec. 4.5.9}$$

$$-a_1 \frac{dP}{dL} - \tau_1 (S_{1e} + S_{1i}) - \tau_{12} S_{12} - F_{1g} = 0 \quad \text{Ec. 4.5.10}$$

$$-a_2 \frac{dP}{dL} + \tau_{12} S_{12} - \tau_2 (s_{2e} + s_{2i}) - \tau_{23} s_{23} - F_2 - F_{23} - F_{2g} = 0 \quad \text{Ec. 4.5.11}$$

$$c_1 = 2 \int_{y_2+y_3}^{d_e} \frac{c_2 e^{-\frac{V_{ht}(y-(y_2+y_3))}{\varepsilon_p}} \left( \sqrt{2r_e - y} \sqrt{y} - \sqrt{-e_e^2 + r_i^2 + 2e_e y - y^2} \right) dy}{a_1} \quad \text{Ec. 4.5.12}$$

$$u_2 = \sqrt{\frac{4d_p (s-1) g \left( c_2 \left( \frac{y_2 - d_p}{d_p} \right) + 1 \right) \sin(\theta + \varphi)}{3(C_D \cos \varphi + C_L \sin \varphi)}} \quad \text{Ec. 4.5.13}$$

Con seis incógnitas  $y_3$ ,  $y_2$ ,  $c_1$ ,  $u_1$ ,  $u_2$  y  $\frac{dP}{dL}$ . Resolviendo  $u_1$  y  $c_1$  de las ecuaciones **4.5.8** y **4.5.9** obtenemos:

$$u_1 = \frac{-a_2 u_2 + a_a u_a}{a_1} \quad \text{Ec. 4.5.14}$$

Y

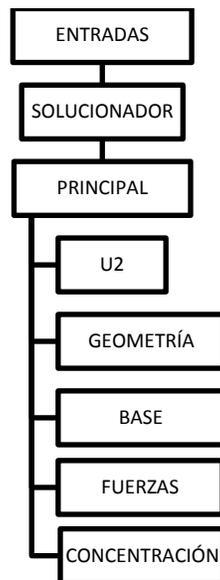
$$c_1 = \frac{a_2 c_2 u_2 - a_a c_a u_a}{a_2 u_2 - a_a u_a} \quad \text{Ec. 4.5.15}$$

Por otro lado, Igualando los gradientes de presión de las ecuaciones **4.5.10** y **4.5.11** llegamos a:

$$\frac{-s_1 \tau_1 - s_{12} \tau_{12} - a_1 \rho_1 g \cos \theta}{a_1} = \frac{-F_2 - F_{23} + s_{12} \tau_{12} - s_2 \tau_2 - s_{23} \tau_{23} - a_2 \rho_2 g \cos \theta}{a_2} \quad \text{Ec. 4.5.16}$$

Las ecuaciones **4.5.14**, **4.5.15** son función de las incógnitas  $u_2$ ,  $y_2$  y  $y_3$ . Donde  $u_2$  es obtenida mediante la ecuación **4.5.13**, véase el **Apéndice A**. Para obtener el valor de  $y_2$  y  $y_3$  es necesario resolver el sistema de ecuaciones comprendido por **4.5.12** y **4.5.16**.

En general, se han desarrollado las ecuaciones necesarias para calcular el espesor de la cama de sólidos estacionaria generada en la perforación de pozos direccionales y altamente desviados. Dichas ecuaciones son resueltas de forma numérica iterando valores del espesor de la cama de sólidos estacionaria para el caso del patrón de flujo en dos capas, y además, el espesor de la cama de sólidos móvil para el caso del patrón de flujo en tres capas. El programa para la solución numérica del modelo fue desarrollado en el software MATLAB® con el siguiente diagrama de funciones:



**Tabla 4.5.1 Funciones del programa desarrollado para la solución del modelo**

- ENTRADAS: en esta función se introducen los valores constantes y que no varían con la iteración de las variables a encontrar. Alguno de esos valores son:
  - Parámetros operativos de perforación
    - ROP
    - RPM
    - Gasto de fluido de perforación
  - Geometría del pozo
    - Inclinación
    - Diámetro del agujero
    - Diámetro de la sarta
    - Excentricidad de la sarta
    - Diámetro de la barrena
  - Propiedades físicas del recorte
    - Densidad
    - Esfericidad
    - Diámetro
  - Propiedades físicas del fluido de perforación
    - Densidad
    - Reología

- **SOLUCIONADOR:** en esta función se manda a llamar la función FSOLVE, que es la librería en MATLAB® que implementa el método numérico iterativo para solucionar las ecuaciones no lineales desarrolladas anteriormente. Por lo tanto, itera valores de:

| Modelo     | Incógnitas         |
|------------|--------------------|
| Dos capas  | • $y_2$            |
| Tres capas | • $y_3$<br>• $y_2$ |

Tabla 4.5.1

- **PRINCIPAL:** es la función que contiene el sistema de ecuaciones que FSOLVE resuelve iterando las incógnitas vistas arriba. A su vez, ésta tiene las subfunciones :
  - **U2:** en esta función se calculan los valores del coeficiente de arrastre y levantamiento definidos en el apartado 3.2. al igual que el valor de la velocidad de la cama de sólidos móvil, véase el **Apéndice A**.

| Modelo     | Entradas | Salidas                       |
|------------|----------|-------------------------------|
| Dos capas  | N/A      | N/A                           |
| Tres capas | • $y_2$  | • $C_D$<br>• $C_L$<br>• $u_2$ |

Tabla 4.5.2

- **GEOMETRÍA:** es una función que contiene las ecuaciones desarrolladas en el apartado 4.1. Dichas ecuaciones son función de las variables iteradas del espesor de la cama móvil  $y_2$  y la cama estacionaria  $y_3$  para el caso del modelo de tres capas y solamente de  $y_3$  en el modelo de dos capas. De esta función se tienen las entradas y salidas:

| Modelo     | Entradas           | Salidas  |
|------------|--------------------|--|
| Dos capas  | • $y_3$            | • $a_1$<br>• $S_{1e}$<br>• $S_{1i}$<br>• $S_{12}$<br>• $d_{h1}$  |
| Tres capas | • $y_2$<br>• $y_3$ | • $a_1$<br>• $a_2$<br>• $S_{1e}$<br>• $S_{1i}$<br>• $S_{12}$<br>• $S_{2i}$<br>• $S_{2e}$<br>• $S_{23}$ |

|  |  |
|--|--|
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>d_{h1}</math></li> <li>• <math>d_{h2}</math></li> </ul> |
|--|--|

Tabla 4.5.3

- BASE: es una función que calcula los parámetros de velocidad, concentración y régimen de flujo en las capas, para posteriormente calcular las fuerzas que se ejercen en el medio. En esta función se tienen las entradas y salidas:

| Modelo            | Entradas   | Salidas  |
|-------------------|--|--|
| <b>Dos capas</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>a_1</math></li> <li>• <math>d_{h1}</math></li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>u_1</math></li> <li>• <math>c_1</math></li> <li>• <math>\rho_1</math></li> <li>• <math>Re_1</math></li> </ul>   |
| <b>Tres capas</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>a_1</math></li> <li>• <math>a_2</math></li> <li>• <math>d_{h1}</math></li> <li>• <math>d_{h2}</math></li> <li>• <math>u_2</math></li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>u_1</math></li> <li>• <math>c_1</math></li> <li>• <math>\rho_1</math></li> <li>• <math>\rho_2</math></li> <li>• <math>Re_1</math></li> <li>• <math>Re_{12}</math></li> <li>• <math>Re_2</math></li> </ul> |

Tabla 4.5.4

- FUERZAS: es una función que calcula las fuerzas que se generan entre el flujo y el medio en que circula, véase la figura 4.2.1 y 4.2.2. se tiene la relación de entradas y salidas:

| Modelo            | Entradas   | Salidas   |
|-------------------|--|---|
| <b>Dos capas</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>u_1</math></li> <li>• <math>\rho_1</math></li> <li>• <math>Re_1</math></li> <li>• <math>d_{h1}</math></li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\tau_1</math></li> <li>• <math>\tau_{12}</math></li> <li>• <math>F_{1g}</math></li> </ul>  |
| <b>Tres capas</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>u_1</math></li> <li>• <math>u_2</math></li> <li>• <math>\rho_1</math></li> <li>• <math>\rho_2</math></li> <li>• <math>Re_1</math></li> <li>• <math>Re_{12}</math></li> <li>• <math>Re_2</math></li> <li>• <math>d_{h1}</math></li> <li>• <math>d_{h2}</math></li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\tau_1</math></li> <li>• <math>\tau_2</math></li> <li>• <math>\tau_{12}</math></li> <li>• <math>\tau_{23}</math></li> <li>• <math>F_{1g}</math></li> <li>• <math>F_{12}</math></li> <li>• <math>F_{23}</math></li> </ul> |

Tabla 4.5.5

- CONCENTRACIÓN: en esta función se resuelve de forma numérica la integral de la ecuación 4.3.17 o 4.3.16, se tiene la relación de entrada y salida:

| <b>Modelo</b>     | <b>Entradas</b>  | <b>Salidas</b>   |
|-------------------|--|--|
| <b>Dos capas</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>y_3</math></li> <li>• <math>u_1</math></li> </ul>                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>c_1</math></li> </ul> |
| <b>Tres capas</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>y_3</math></li> <li>• <math>y_2</math></li> <li>• <math>u_1</math></li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>c_1</math></li> </ul> |

Tabla 4.5.6

De esta manera en la función PRINCIPAL quedan definidas las ecuaciones 4.5.4, 4.5.5, 4.5.13 y 4.5.16 y es resuelta por la función SOLUCIONADOR.

# CAPÍTULO 5

## 5. VALIDACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El objetivo del presente estudio es predecir el espesor de la cama estacionaria en las secciones altamente inclinadas de los pozos, de  $60^\circ$  a  $90^\circ$ , en función de parámetros de campo en la perforación de los mismos. Para validar el modelo desarrollado es necesario comparar los resultados calculados del espesor de la cama estacionaria con los observados experimentalmente y posteriormente analizar la sensibilidad del espesor en función de los distintos parámetros en las operaciones de perforación.

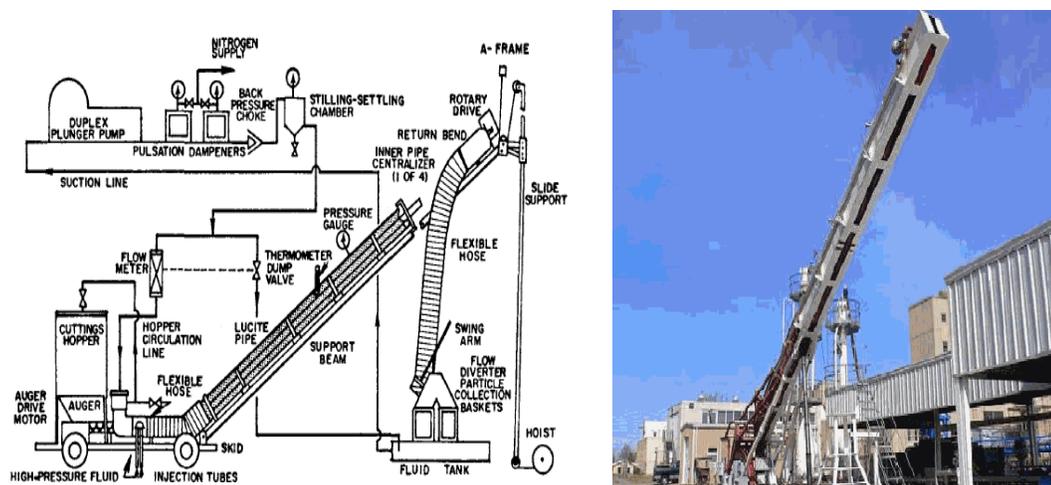


Fig. 5.1 Diagrama del pozo experimental usado por P.H. Tomren [3].

Tomren et al [8] midieron experimentalmente el espesor de la cama de sólidos estacionaria generada en una sección de prueba para simular un pozos direccionales y altamente desviados, véase figura 5.1. Dicho simulador forma parte del proyecto de investigación de perforación, TUDRP por sus siglas en inglés, de la universidad de Tulsa, Arizona. Fue diseñado para simular el flujo anular de un pozo bajo distintas configuraciones de gasto de lodo de perforación, velocidad de penetración, inclinación del pozo, rotación de la sarta de perforación, geometría anular, etc. Con el objetivo de recrear las condiciones reales de perforación en el campo. Algunas de las características principales del simulador son:

- Medios independientes de circulación de la fase líquida y la inyección de la fase sólida.
- Una sección anular suficientemente larga para asegurar un flujo bifásico sólido y líquido en estado estacionario.
- Un medio eficiente para separar las fases sólido y líquido antes de recircularlos
- Medios para rotar la tubería interna del pozo.

- Medios confiables para controlar y medir la velocidad de flujo de la fase sólida, la velocidad de inyección de sólidos y la velocidad de rotación de la tubería interna.
- Medios para estimar la velocidad promedio de transporte y la concentración de los sólidos independientemente del tipo de fluido usado.
- Medios para simular la excentricidad de la tubería interna sin afectar la rotación de la misma.

Por otro lado, los resultados del modelo propuesto deben ser útiles en la operación de campo, por lo que se analiza la sensibilidad del espesor de la cama de sólidos obtenida por el modelo en función de la variación de parámetros de campo como; la densidad y viscosidad del fluido de perforación, la densidad y esfericidad de los recortes, excentricidad y revoluciones de la tubería interna, velocidad de penetración de la barrena y ángulo de inclinación del pozo.

Para la validación del modelo propuesto, se han comparado los resultados del espesor de la cama de sólidos estacionaria medidos en el estudio experimental de Tomren [4] y los obtenidos por el modelo desarrollado. Con los siguientes parámetros operativos:

| Parámetro                                  | Experimental | Modelo |
|--|--------------|--------|
| <b>Diámetro externo</b>                    | 12.7         | 13     |
| <b>Diámetro interno</b>                    | 4.826        | 5      |
| <b>Densidad del fluido</b>                 | 1.01         | 1      |
| <b>Densidad del sólido</b>                 | 2.61         | 2.6    |
| <b>Diámetro de la partícula</b>            | 0.635        | 0.63   |
| <b>Índice de comportamiento del fluido</b> | 0.6          | 0.6    |
| <b>Índice de consistencia del fluido</b>   | 2.82         | 2.8    |
| <b>RPM</b>                                 | 50           | 50     |
| <b>Gasto de sólidos</b>                    | 151          | 154    |

Tabla 5.1 Datos utilizados para validar los resultados del modelo propuesto. Sistema de unidades CGS.

## 5.1 VALIDACIÓN

En la gráfica 5.1.1, se observa el comportamiento del espesor de la cama de sólidos obtenido por el estudio experimental y por el modelo de tres capas propuesto a una inclinación de 80° medidos desde la vertical. Ambos espesores presentan el mismo comportamiento, la cama de sólidos estacionaria disminuye a media que la velocidad anular promedio incrementa, hasta llegar a erosionarse aproximadamente a 150 *cm/seg* de velocidad. Cabe resaltar que en los estudios experimentales se definió que en promedio la velocidad mínima de transporte o MTV para erosionar la cama de sólidos estacionaria en la sección de alta inclinación de  $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  debe ser mayor a 150 *cm/seg* [4]. El error promedio entre los espesores medidos experimentalmente y los obtenidos por el modelo en esta comparación es de alrededor del 5%. Por otro lado, en la gráfica 5.1.2 a 80° de inclinación y utilizando el modelo de dos capas, se observa el mismo comportamiento de disminución del espesor de la cama a medida que aumenta la

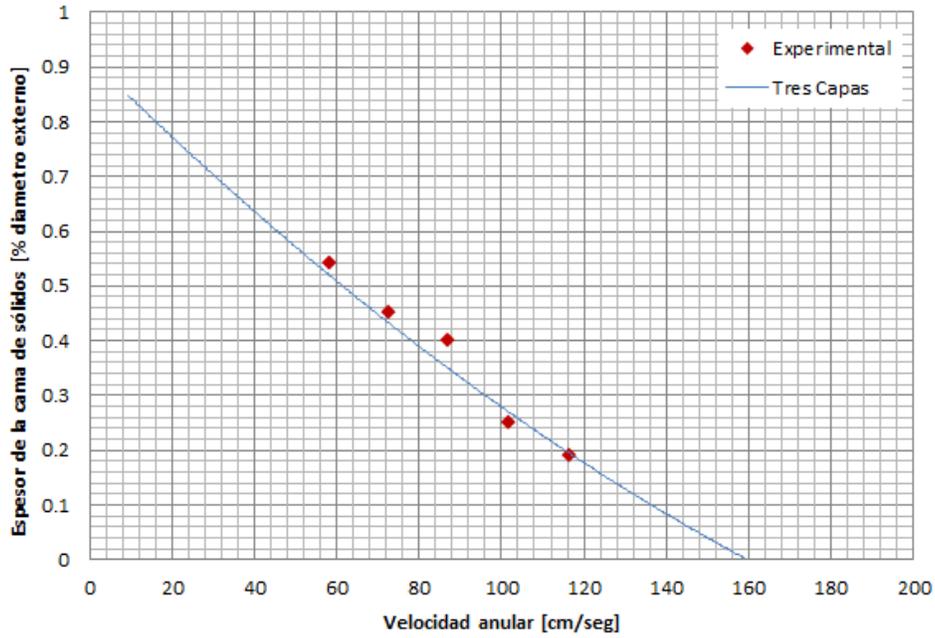
velocidad anular promedio, sin embargo, se erosiona completamente a  $170 \text{ cm/seg}$ , lo que representa una mayor MTV que la calculada por el modelo de tres capas a las mismas condiciones de operación. El error promedio calculado en esta comparación es del 10%.

En la gráfica **5.1.3**, el modelo de tres capas a  $60^\circ$  de inclinación, se observa que el espesor de la cama de sólidos es un poco menor que la formada a  $80^\circ$ , aunque la variación fue muy pequeña. La MTV calculada a la que se erosiona la cama es de  $170 \text{ cm/seg}$ . Lo que sigue estando cerca de  $150 \text{ cm/seg}$  [4] medidos experimentalmente para la erosión de la cama estacionaria a altos grados de inclinación. El error promedio entre los espesores calculados experimentalmente y por el modelo en esta comparación es del 6%. Para el modelo de dos capas, se obtiene una MTV de  $160 \text{ cm/seg}$  para la erosión de la cama estacionaria, véase gráfica **5.1.4**. El error promedio en esta última comparación es de 6%.

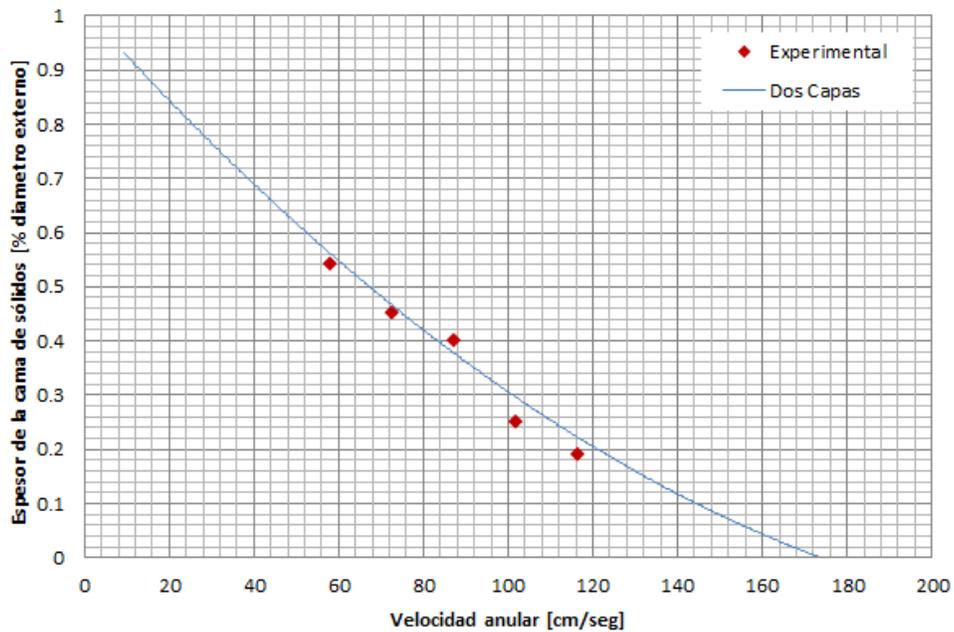
En la gráfica **5.1.5** a  $40^\circ$  de inclinación del pozo, el modelo de tres capas resulta en una MTV de erosión de la cama de sólidos de  $150 \text{ cm/seg}$  y un error respecto a los espesores obtenidos experimentalmente del 9%. En la gráfica **5.1.6**, el modelo de dos capas a  $40^\circ$  de inclinación resulta en una MTV de erosión de la cama de sólidos estacionaria alrededor de  $140 \text{ cm/seg}$ . Experimentalmente se observó que en la sección de ángulos críticos la velocidad para erosionar la cama de sólidos debe ser mayor a  $91 \text{ cm/seg}$  [4]. El error promedio entre los espesores medidos experimentalmente y calculados en esta comparación es del 11%.

En la gráfica **5.1.7** y **5.1.8** a  $20^\circ$  de inclinación, el modelo de tres y dos capas muestra que el espesor de la cama estacionaria se ha reducido considerablemente en comparación a los casos anteriores y se erosiona por completo a una MTV de 90 a  $110 \text{ cm/seg}$ . De acuerdo a las mediciones experimentales, son necesarias velocidades mayores a  $91 \text{ cm/seg}$  para erosionar la delgada cama de sólidos estacionaria formada en la sección de baja inclinación [4]. En esta zona es donde se ha obtenido el mayor error entre los resultados experimentales y el modelo propuesto. Cabe mencionar que en la sección de baja inclinación es preferible usar un modelo que no considere si quiera una cama de sólidos debido a que ésta es despreciable [20].

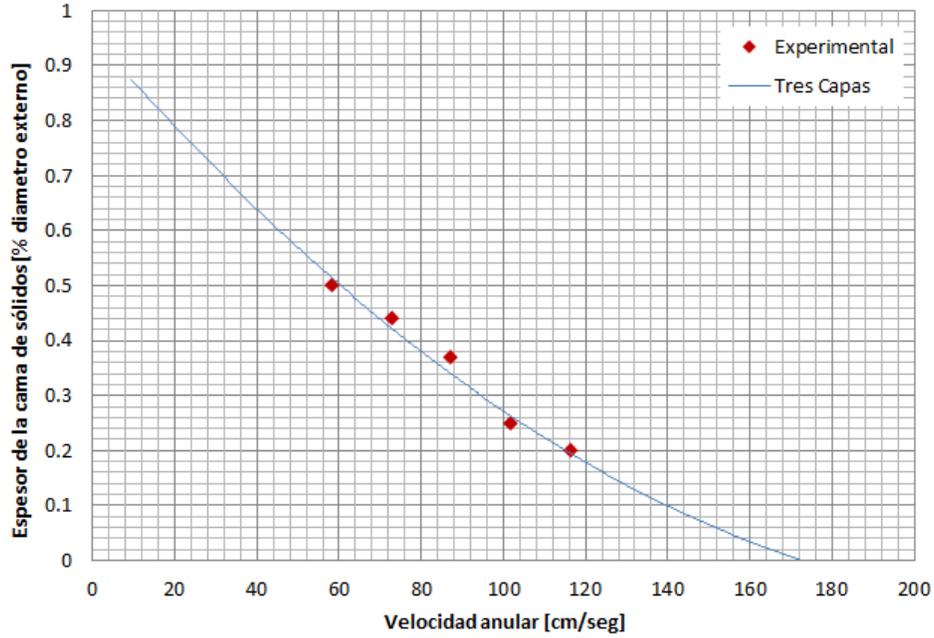
En conclusión, el modelo de dos y tres capas propuesto tiene una precisión aceptable para la predicción del espesor de la cama de sólidos estacionaria en la sección altamente inclinada y de transición, usando un fluido no newtoniano. Para la sección de baja inclinación el modelo es inexacto, sin embargo H. Cho [20] recomienda que cerca de la vertical de  $0^\circ$  a  $30^\circ$  se utilice un modelo hidráulico de una sola capa que no contemple el espesor de una cama de sólidos debido a que ésta es despreciable, por lo que un modelo de una sola capa de flujo en suspensión heterogénea es aplicable. Finalmente en la gráfica **5.1.9**, el coeficiente de determinación, también llamado  $R^2$ , resulta en que el modelo propuesto reproduce en un 90% a los resultados experimentales.



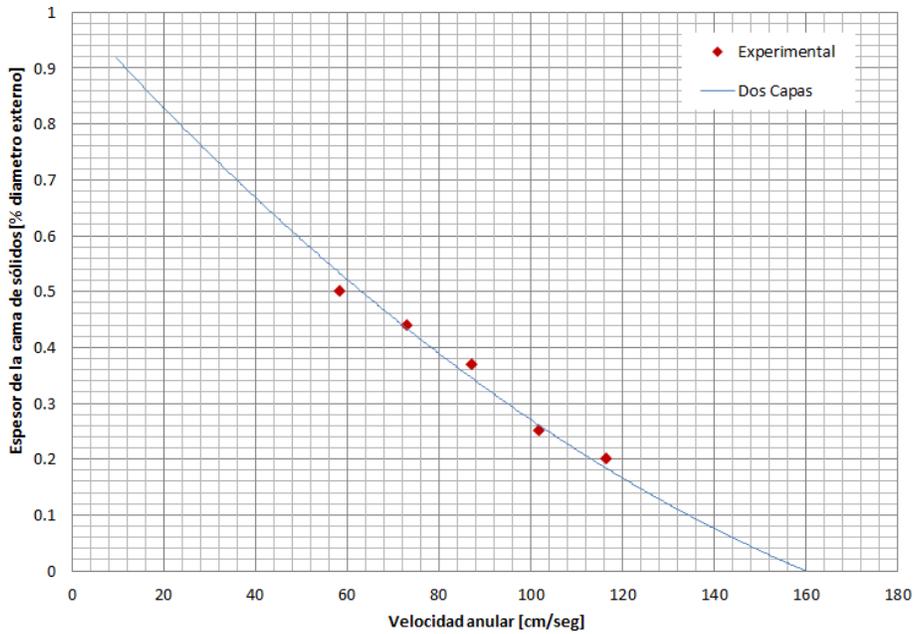
Gráfica 5.1.1 Comparación de los resultados del espesor de la cama de sólidos estacionaria obtenida experimentalmente y del modelo de tres capas propuesto. A 80° de inclinación desde la vertical y K=2.8.



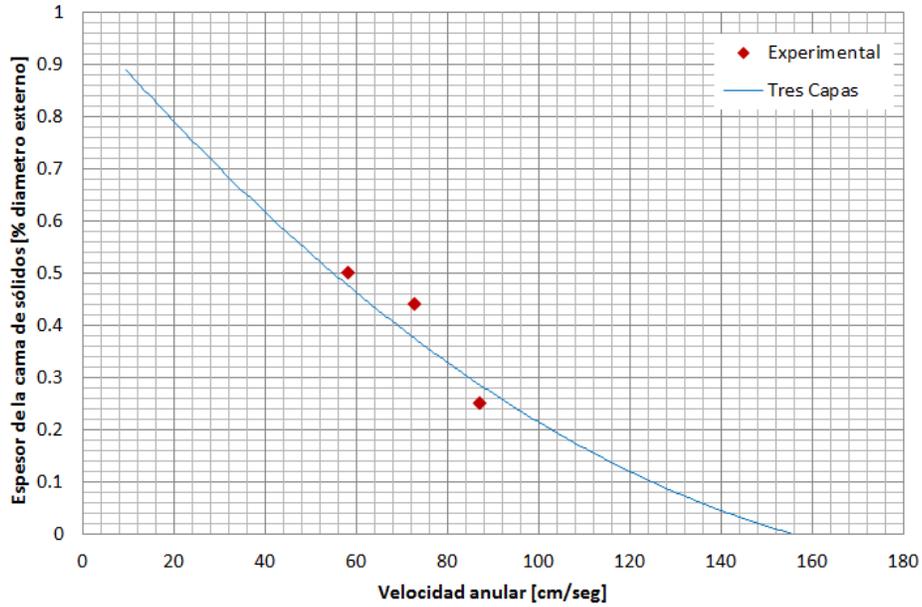
Gráfica 5.1.2 Comparación de los resultados del espesor de la cama de sólidos estacionaria obtenida experimentalmente y del modelo de dos capas propuesto. A 80° de inclinación desde la vertical y K=2.8.



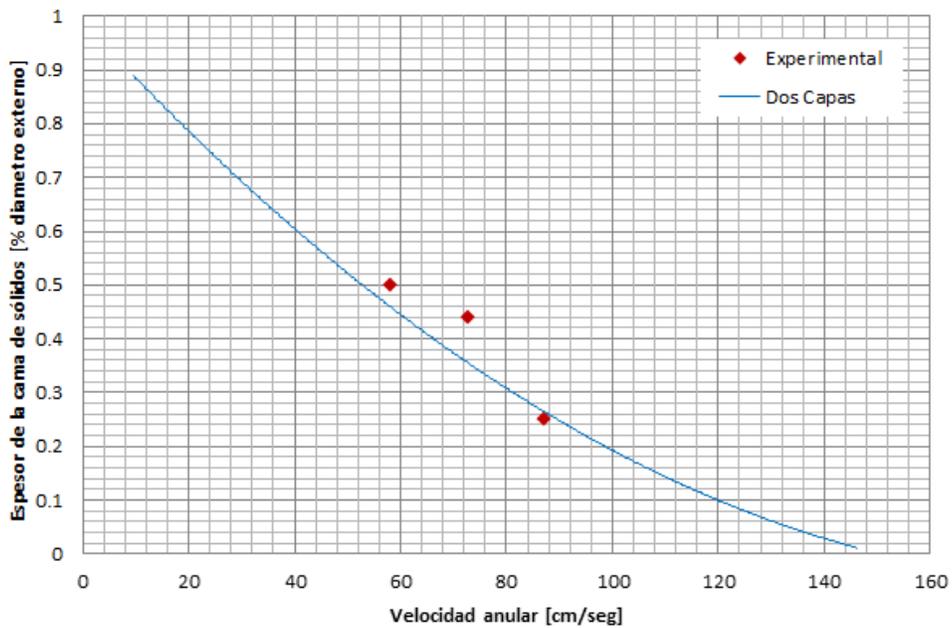
Gráfica 5.1.3 Comparación de los resultados del espesor de la cama de sólidos estacionaria obtenida experimentalmente y del modelo de tres capas propuesto. A 60° de inclinación desde la vertical y  $K=2.8$ .



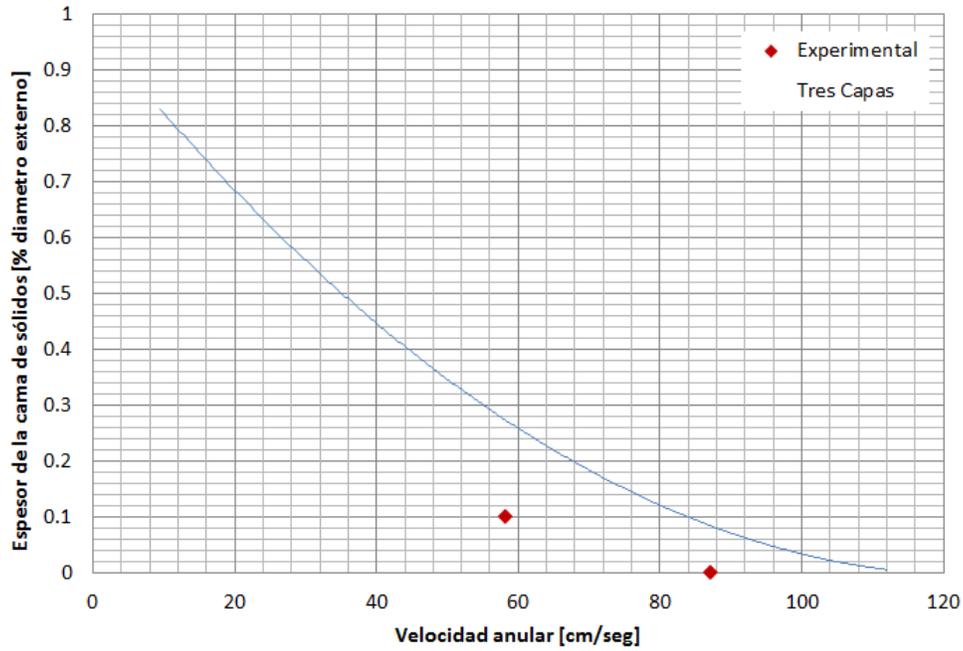
Gráfica 5.1.4 Comparación de los resultados del espesor de la cama de sólidos estacionaria obtenida experimentalmente y del modelo de dos capas propuesto. A 60° de inclinación desde la vertical y  $K=2.8$ .



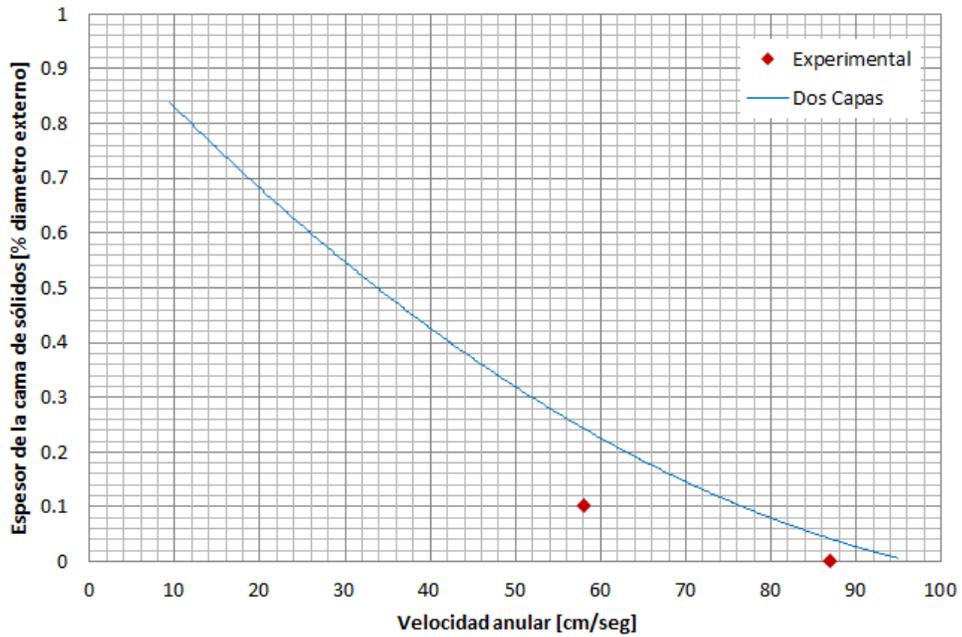
Gráfica 5.1.5 Comparación de los resultados del espesor de la cama de sólidos estacionaria obtenida experimentalmente y del modelo de tres capas propuesto. A 40° de inclinación desde la vertical y K=2.8.



Gráfica 5.1.6 Comparación de los resultados del espesor de la cama de sólidos estacionaria obtenida experimentalmente y del modelo de dos capas propuesto. A 40° de inclinación desde la vertical y K=2.8.



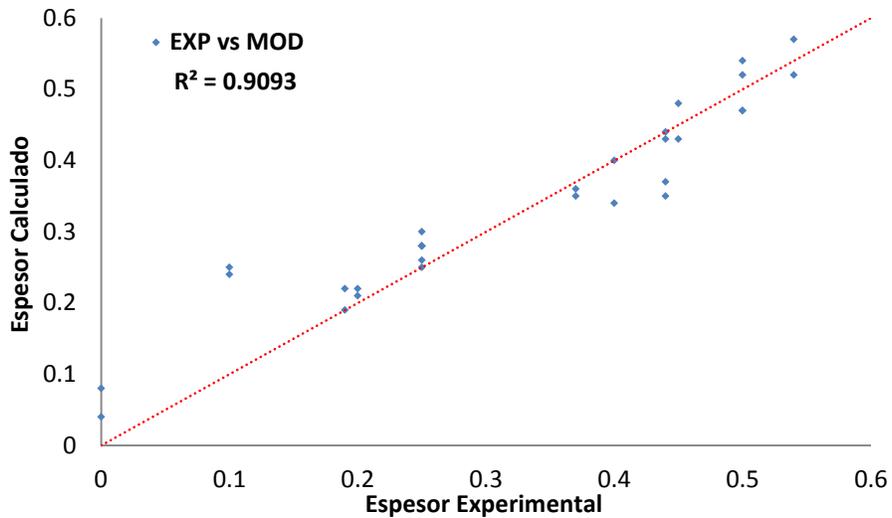
Gráfica 5.1.7 Comparación de los resultados del espesor de la cama de sólidos estacionaria obtenida experimentalmente y del modelo de dos capas propuesto. A 20° de inclinación desde la vertical y K=2.8.



Gráfica 5.1.8 Comparación de los resultados del espesor de la cama de sólidos estacionaria obtenida experimentalmente y del modelo de dos capas propuesto. A 20° de inclinación desde la vertical y K=2.8.

| Sección             | Inclinación   | Velocidad | Experimental | Calculado |
|---------------------|---------------|-----------|--------------|-----------|
| Altamente Inclinada | Tres Capas 80 | 58        | 0.54         | 0.52      |
|                     |               | 73        | 0.45         | 0.43      |
|                     |               | 87        | 0.40         | 0.34      |
|                     |               | 102       | 0.25         | 0.26      |
|                     |               | 116       | 0.19         | 0.19      |
|                     | Dos Capas 80  | 58        | 0.54         | 0.57      |
|                     |               | 73        | 0.45         | 0.48      |
|                     |               | 87        | 0.40         | 0.40      |
|                     |               | 102       | 0.25         | 0.30      |
|                     |               | 116       | 0.19         | 0.22      |
|                     | Tres Capas 60 | 58        | 0.50         | 0.52      |
|                     |               | 73        | 0.44         | 0.43      |
|                     |               | 87        | 0.37         | 0.35      |
|                     |               | 102       | 0.25         | 0.28      |
|                     |               | 116       | 0.20         | 0.22      |
|                     | Dos Capas 60  | 58        | 0.50         | 0.54      |
| 73                  |               | 0.44      | 0.44         |           |
| 87                  |               | 0.37      | 0.36         |           |
| 102                 |               | 0.25      | 0.28         |           |
| 116                 |               | 0.20      | 0.21         |           |
| Transición          | Tres capas 40 | 58        | 0.50         | 0.47      |
|                     |               | 73        | 0.44         | 0.35      |
|                     |               | 87        | 0.25         | 0.25      |
|                     | Dos capas 40  | 58        | 0.50         | 0.47      |
|                     |               | 73        | 0.44         | 0.37      |
|                     |               | 87        | 0.25         | 0.28      |
| Baja Inclinación    | Tres capas 20 | 58        | 0.10         | 0.25      |
|                     |               | 87        | 0            | 0.08      |
|                     | Dos capas 20  | 58        | 0.10         | 0.24      |
|                     |               | 87        | 0            | 0.04      |

Tabla 5.1.1 Error promedio de los espesores medidos experimentalmente y los calculados por el modelo en cada sección de inclinación del pozo.



Gráfica 5.1.9 Coeficiente de determinación de los resultados del espesor de la cama de sólidos calculados por el modelo y los observados experimentalmente.

## 5.2 DISCUSIÓN

El objetivo del modelo desarrollado es que pueda ser tomado en cuenta en el diseño de la perforación de pozos altamente desviados, por lo que el espesor de la cama de sólidos estacionaria calculada por el modelo propuesto debe ser sensible a parámetros de campo que intervienen en el desarrollo de un pozo desviado. Por lo tanto, el análisis de sensibilidad del espesor de la cama estacionaria en función de parámetros como; geometría del pozo, propiedades físicas del fluido de perforación, propiedades físicas de los recortes, velocidad promedio del lodo de perforación, velocidad de penetración de la barrena y geometría de la misma, es relevante para encontrar puntos que puedan ser aprovechados en el diseño del pozo, específicamente en el programa hidráulico para mantener una limpieza adecuada del espacio anular.

A continuación se presentan los resultados del espesor de la cama de sólidos estacionaria calculados por el modelo desarrollado en función de varios parámetros de campo.

### 5.2.1 EFECTO DEL ANGULO DE INCLINACIÓN SOBRE EL ESPESOR LA CAMA DE SÓLIDOS.

La inclinación de un pozo es un parámetro crítico que causa directamente la acumulación de sólidos en el espacio anular. Este fenómeno, como se ha explicado anteriormente, se debe a la relación que existe entre la velocidad de libre asentamiento de la partícula sólida o velocidad de resbalamiento y la velocidad axial de lodo de perforación en el pozo. En las secciones del pozo con inclinaciones mayores a  $60^\circ$ , la velocidad de asentamiento no es contrarrestada totalmente por el flujo del lodo de perforación, lo que ocasiona la formación de la cama de sólidos estacionaria.

En la gráfica **5.2.2.1** y **5.2.2.2** podemos observar el comportamiento del espesor de la cama de sólidos estacionaria en función del ángulo de inclinación del pozo. En general, a  $90^\circ$  grados de inclinación, el espesor de la cama de sólidos estacionaria es alto y va disminuyendo en función de la reducción del ángulo hacia la vertical donde es nula, debido a que la velocidad radial de resbalamiento de la partícula es muy baja o nula, por lo que la velocidad axial de resbalamiento es máxima y es contrarrestada en su totalidad por el flujo axial del fluido de circulación en el pozo.

En la región de baja inclinación,  $10^\circ < \alpha \leq 30^\circ$ , la velocidad radial de resbalamiento se empieza a incrementar, por lo que las partículas sólidas empiezan a depositarse en el fondo del pozo formando una cama de sólidos estacionaria, esto ocurre especialmente a bajas velocidades anulares, a velocidades más altas la cama estacionaria es poco espesa e inestable.

En la región de transición o crítica,  $30^\circ < \alpha \leq 60^\circ$ , la cama de sólidos estacionaria ha incrementado considerablemente y son necesarias velocidades anulares más altas para erosionarla. A altos grados de inclinación,  $60^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ , la cama de sólidos se forma instantáneamente [4]. El espesor de los sólidos varía muy poco con la inclinación en esta región.

### 5.2.2 EFECTO DE LA VELOCIDAD ANULAR SOBRE LA CAMA DE SÓLIDOS.

El fluido de perforación es uno de los elementos más importantes en el proceso de perforación debido a las múltiples funciones que tiene, una de las principales es mantener al pozo libre de sólidos transportándolos desde el fondo del pozo a la superficie, donde es reciclado y recirculado nuevamente. Este parámetro es clave en la limpieza del pozo y es crítico en ángulos de inclinación mayores a  $60^\circ$ . En general, una velocidad de circulación reducida provocará que los sólidos no sean transportados eficientemente a la superficie y se acumulen en el pozo en forma de cama estacionaria.

En la gráfica **5.2.2.1** es claro que el espesor de la cama de sólidos estacionaria es función de la velocidad anular del fluido de perforación y el ángulo del pozo. A medida que aumenta la velocidad anular, la cama de sólidos se va erosionando, por lo que son inversamente proporcionales, y al disminuir el ángulo de inclinación medido desde la vertical el espesor de la disminuye, por lo que son directamente proporcionales.

En la región de alta inclinación  $60^\circ < \alpha \leq 90^\circ$  la velocidad anular debe ser mayor a  $150 \text{ cm/seg}$  para mantener el pozo libre de cama de sólidos de acuerdo a los estudios experimentales de Tomren et al [4]. La velocidad crítica en la región de transición  $30^\circ < \alpha \leq 60^\circ$  debe ser mayor a  $91 \text{ cm/seg}$  para evitar la formación de la cama [4]. En la región de baja inclinación  $10^\circ < \alpha \leq 30^\circ$  la velocidad debe mantenerse por arriba de  $91 \text{ cm/seg}$  para que el pozo esté limpio de sólidos. Finalmente en la región cercana a la vertical  $\alpha \leq 10^\circ$  el espesor de la cama de sólidos es nulo o despreciable debido a que los sólidos no tienden a asentarse en el fondo del pozo ya que la componente de velocidad radial de resbalamiento es prácticamente nula.

### 5.2.3. EFECTO DE LA REOLOGÍA SOBRE LA CAMA DE SÓLIDOS.

El fluido de perforación tiene dos características físicas principales; la densidad y la viscosidad. La densidad tiene efectos directos sobre el peso del lodo y a su vez sobre el control de las presiones de la formación. La viscosidad está relacionada directamente con el régimen de flujo del lodo de perforación mediante el número de Reynolds.

En **Gráfica 5.2.3.1** el fluido más viscoso tiene un efecto positivo en la formación una cama de sólidos estacionaria menos espesa que utilizando un fluido de viscosidad media y baja. A todos los ángulos de inclinación del pozo se mantiene este comportamiento. La diferencia de la cama de sólidos formada por los tres fluidos es marcada, siendo el más eficiente el fluido más viscoso, continuando con el de mediana viscosidad y por último el menos viscoso.

### 5.2.4 EFECTO DE LA DENSIDAD DEL FLUIDO EN CIRCULACIÓN SOBRE LA CAMA DE SÓLIDOS.

La densidad del fluido de perforación tiene efectos sobre el equilibrio de las presiones de formación; presión de poro y fractura. Por lo que al momento de perforar, la densidad del lodo mantiene bajo control dichas presiones. Por otro lado, la densidad también tiene un efecto directo en el transporte de los sólidos debido al efecto de flotación entre la fase

sólida y líquida, en general, un fluido muy denso proveerá de mayor flotación a las partículas sólidas y viceversa.

En la gráfica **5.2.4.1** se observa claramente los efectos del incremento de la densidad del fluido en circulación sobre la formación de la cama de sólidos estacionaria. Al incrementar la densidad del fluido, el espesor de la cama de sólidos disminuye. Esto debido a que al incrementar la densidad del fluido el efecto de flotación de las partículas sólidas incrementa, por lo que la velocidad de resbalamiento o asentamiento disminuye. También al incrementar la densidad del fluido de perforación la velocidad crítica para desvanecer la cama de sólidos estacionaria disminuye.

### **5.2.5 EFECTO DE LA DENSIDAD DE LOS RECORTES SOBRE LA CAMA DE SÓLIDOS.**

La densidad de los recortes generados por la barrena depende directamente de las características físicas de la formación que se esté atravesando en el momento de la perforación. Las rocas sedimentarias como la arenisca, calizas o dolomías tienen densidades en el rango de 2.0 a 2.6 *gr/cm*. En general, el efecto de flotación de una partícula muy densa será menor que en una menos densa.

En la gráfica **5.2.5.1** se observa que el espesor de la cama de sólidos estacionaria incrementa si a su vez lo hace la densidad del sólido. A diferencia de incrementar la densidad del fluido, al aumentar la densidad del sólido la fuerza ascendente de flotación disminuye ocasionando que la velocidad de resbalamiento o de asentamiento incremente. Finalmente los sólidos se depositarán con mayor facilidad formando la cama de sólidos.

### **5.2.6 EFECTO DEL DIÁMETRO DEL SÓLIDO SOBRE LA FORMACIÓN DE LA CAMA ESTACIONARIA DE RECORTES.**

Las características geométricas del recorte generado por la barrena dependen del tipo de formación atravesada y las características operativas de la propia barrena. El diámetro del recorte tiene efectos directos sobre la velocidad de resbalamiento de la partícula, ya que el diámetro es relacionado al peso, fuerza de arrastre y fuerza de levantamiento del sólido.

En la gráfica **5.2.6.1** observamos que a mayor diámetro de partícula se forma una cama de sólidos estacionaria más espesa, por otro lado, para el diámetro más pequeño se obtiene el espesor más bajo de cama de sólidos. Al incrementar el diámetro de la partícula también incrementa la velocidad a la que esta resbala o se asienta, incrementa el número de Reynolds y disminuye el coeficiente de arrastre.

### **5.2.7 EFECTO DE LA ESFERICIDAD DE LOS RECORTES SOBRE LA FORMACIÓN DE LA CAMA ESTACIONARIA DE SÓLIDOS.**

La esfericidad de los recortes depende de las características físicas de la formación y parámetros operativos de la barrena. La esfericidad de un sólido es medida en el rango de 0 a 1. Cuando no es esférico en su totalidad equivale a 0 y cuando es totalmente esférico,

toma el valor de 1. Este parámetro tiene efectos directos sobre el coeficiente de arrastre. En general, a mayor esfericidad, el sólido tiene una superficie más uniforme, acercándose a la superficie de una esfera, por lo que el fluido se puede mover con mayor facilidad sobre su superficie y viceversa.

En **Gráfica 5.2.7.1** se observa claramente que el recorte de menor esfericidad, 0.6, genera la menor cama de sólidos, y el recorte totalmente esférico, 1, genera la cama de sólidos más espesa. Una partícula totalmente esférica posee mejores propiedades hidrodinámicas, por lo que se puede desplazar con menor dificultad a través de los fluidos a diferencia de una no esférica. Al disminuir la esfericidad de un sólido el coeficiente de arrastre incrementa, lo que implica que la velocidad a la que se desplaza es menor. Por otro lado, que la esfericidad sea menor que 1, indica que el área de la partícula sólida expuesta al flujo es mayor, por existirá mayor fuerza de arrastre, en consecuencia una velocidad menor a la de una esfera.

#### **5.2.8 EFECTO DE LA VELOCIDAD DE PENETRACIÓN EN DE LA BARRENA SOBRE LA FORMACIÓN DE LA CAMA DE SÓLIDOS ESTACIONARIA.**

La velocidad de penetración de la barrena depende del tipo de barrena que se esté usando y las propiedades mecánicas de la formación atravesada. También interfieren factores como el tiempo planeado para la perforación de un pozo. La velocidad de penetración, ROP, tiene efectos directos sobre la concentración de sólidos en el espacio anular, ya que a mayor ROP, el flujo volumétrico de la fase sólida que entra al pozo es mayor, por lo que se tendrá mayor cantidad de sólidos asentándose y formando una cama estacionaria en el fondo del pozo.

En gráfica **5.2.8.1** la mayor velocidad de penetración de la barrena,  $0.8 \text{ cm/seg}$ , genera una cama de sólidos estacionaria mayor, a diferencia de cuando es menor,  $0.4 \text{ cm/seg}$ , la cama de sólidos formada es menos espesa. Es claro que al aumentar la velocidad de penetración de la barrena incrementará el volumen de sólidos en el pozo, por lo que aumenta la cantidad de sólidos que se asentarán y formaran una cama de sólidos.

#### **5.2.9 EFECTO DEL DIÁMETRO DE LA BARRENA SOBRE LA FORMACIÓN DE LA CAMA DE SÓLIDOS.**

El diámetro de la barrena depende de la etapa del pozo que se esté perforando. Por otro lado, El diámetro de la barrena está directamente relacionado con la concentración de sólido en el espacio anular debido a que entre mayor área transversal tenga la barrena mayor será el volumen sólidos que entre en el espacio anular, dicho volumen entra a la velocidad de penetración de la barrena.

En la gráfica **5.2.9.1** se observa el efecto del diámetro de la barrena sobre la formación de la cama estacionaria de sólidos. Al usar una barrena con diámetro de  $13 \text{ cm}$ , el espesor de la cama de sólidos formada es mayor que si emplea una de menor diámetro,  $10 \text{ cm}$ .

#### **5.2.10 EFECTOS DE LA EXCENTRICIDAD DE LA TUBERÍA INTERNA SOBRE LA FORMACIÓN DE LA CAMA DE SÓLIDOS.**

La excentricidad de la tubería interna o sarta de perforación depende de los esfuerzos a la que esta se encuentra sometida y se mide de 0 a 1. Cuando la tubería interna se encuentra totalmente descentrada respecto al agujero o tubería exterior, la excentricidad toma un valor de 1. Cuando esta se encuentra totalmente centrada respecto al agujero o tubería exterior, la excentricidad vale 0. En las secciones del pozo altamente inclinadas la tubería interna puede estar reposando sobre la pared del pozo, por lo que se encontraría totalmente descentrada, este fenómeno disminuye a medida que el pozo se va acercando a la vertical. La excentricidad de la sarta de perforación afecta el área en el que circula el fluido de perforación y los recortes generados por la barrena, por lo que la ampliación o reducción del área de circulación afectará el transporte de los sólidos.

En la gráfica **5.2.8.1** se observa que cuando la tubería es concéntrica,  $exc = 0$ , la formación de la cama de sólidos es menor que cuando es totalmente excéntrica,  $exc = 1$ . Esto se debe a que el perfil de velocidades varía conforme el espacio entre la tubería interna y externa cambia. A medida que la tubería interna se acerca a la externa, excentricidad de cero a uno, el perfil de velocidad se reduce por lo que tiene menor capacidad de transportar los sólidos. Cuando llega a ser totalmente excéntrica, la capacidad de acarreo en esta zona se vuelve nula, por lo que los sólidos se asientan de manera más fácil en esta zona.

#### **5.2.11 EFECTO DE LA ROTACIÓN DE LA TUBERÍA INTERNA SOBRE LA FORMACIÓN DE LA CAMA DE SÓLIDOS.**

La velocidad de rotación de la tubería interna o sarta de perforación depende del tipo de barrena usada y la velocidad de penetración de la misma. El efecto de la rotación de la tubería interna sobre el espesor de la cama de sólidos se lleva a cabo mediante una erosión mecánica e hidráulica. El efecto mecánico se debe a la fricción entre la sarta de perforación girando y la cama de sólidos estacionaria, mientras que el efecto hidrodinámico es debido a la turbulencia generada al flujo principal por la rotación de la tubería interna. Por simplicidad [23], el efecto hidrodinámico es tomado en cuenta mediante la suma de la velocidad axial del fluido de perforación y la velocidad tangencial que depende de la velocidad radial de la tubería interna, y está dada por:

$$u_{\theta} = \frac{1}{2} \left( \frac{d_{dp}}{2} \right) \omega_p \quad \text{Ec. 5.2.11.1}$$

$$u_{1c} = \sqrt{u_1^2 + u_{\theta}^2} \quad \text{Ec. 5.2.11.2}$$

Donde  $\omega_p$  es la velocidad de rotación de la sarta de perforación,  $d_{dp}$  es el diámetro de la tubería interna,  $u_{\theta}$  es la componente tangencial de la velocidad y  $u_{1c}$  es la velocidad compuesta resultante.

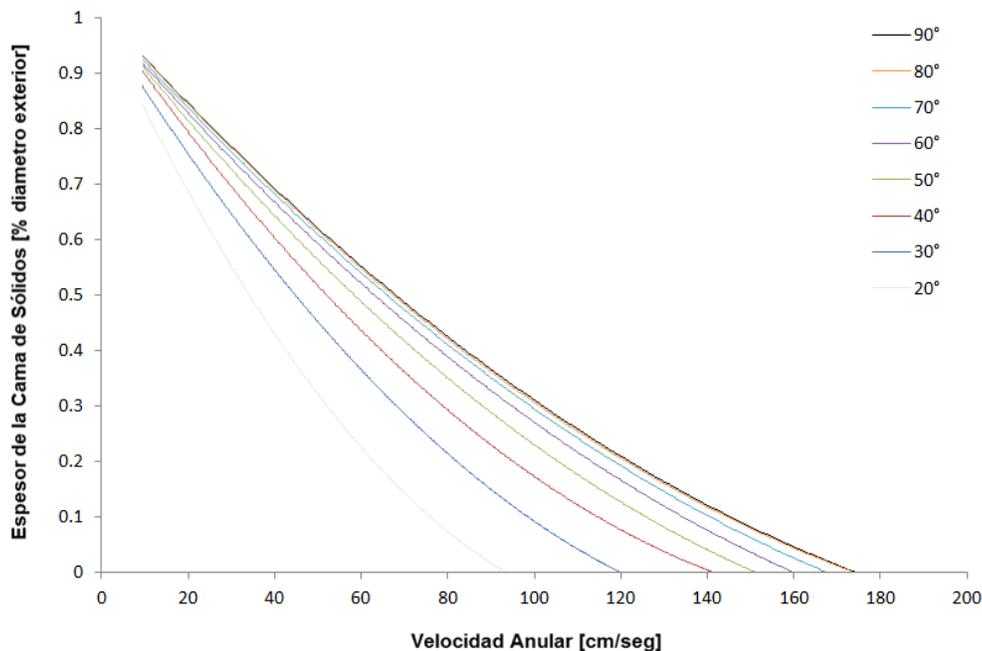
En la gráfica **5.2.11.1** se observa el efecto de la rotación de la tubería interna sobre la formación de la cama de sólidos estacionaria. El modelo muestra que la rotación de la sarta genera una cama de sólidos menos espesa que cuando se encuentra estática. Esto

concuenda con el estudio experimental de J.T. Ford [5] donde demuestra que la rotación de la tubería interna disminuye la velocidad mínima de transporte para rodar o levantar las partículas sólidas.

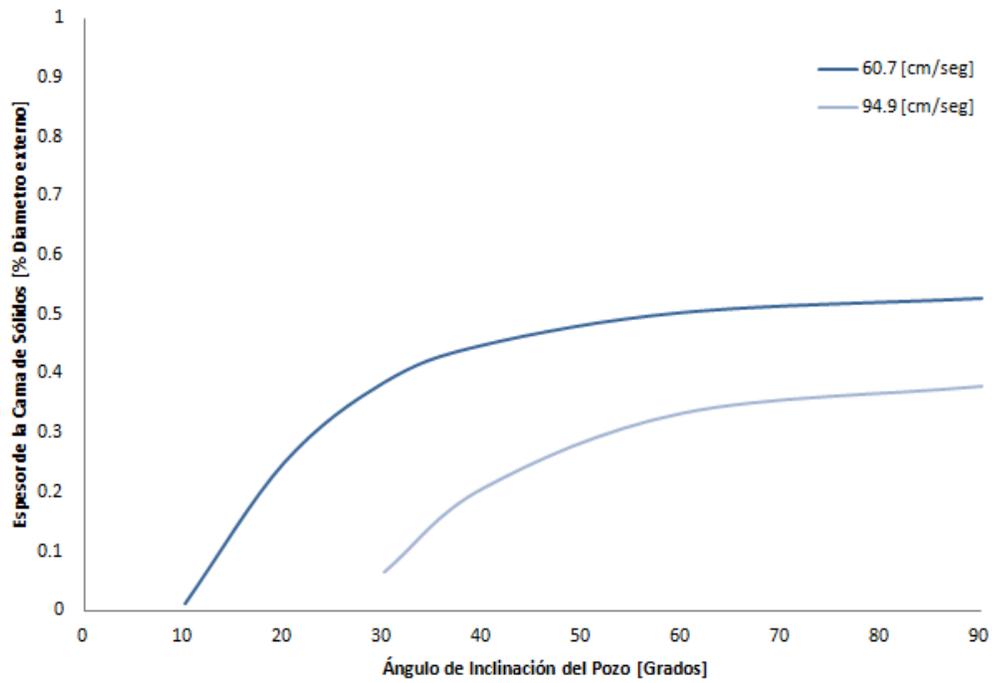
### 5.2.12 EFECTO DEL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA INTERNA Y EXTERNA SOBRE LA FORMACIÓN DE LA CAMA DE SÓLIDOS.

El diámetro de la tubería interna y el del agujero o tubería externa dependen de la profundidad a la que se está perforando y a su vez de los esfuerzos de operación de la misma. El efecto de la geometría del espacio anular, en la que interviene también la excentricidad de la tubería interna, tiene un claro efecto sobre la formación de la cama de sólidos estacionaria, esto debido a que representa el área en la que circula la mezcla sólidos y líquida y está ligada a la velocidad total de la mezcla.

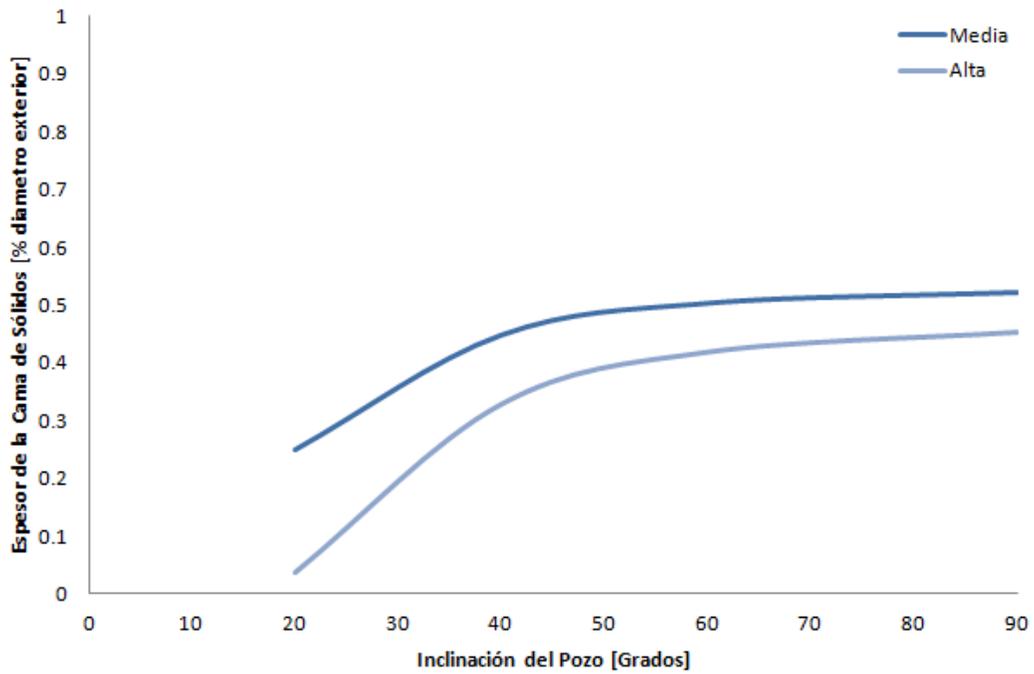
En gráfica 5.2.12.1 se observa que el espesor de la cama de sólidos estacionaria es sensible al diámetro de la tubería interna. A medida el diámetro incrementa, la cama de sólidos crece. Por el contrario, cuando el diámetro del pozo o tubería externa es la que crece, la cama de sólidos disminuye, véase la gráfica 5.2.12.2.



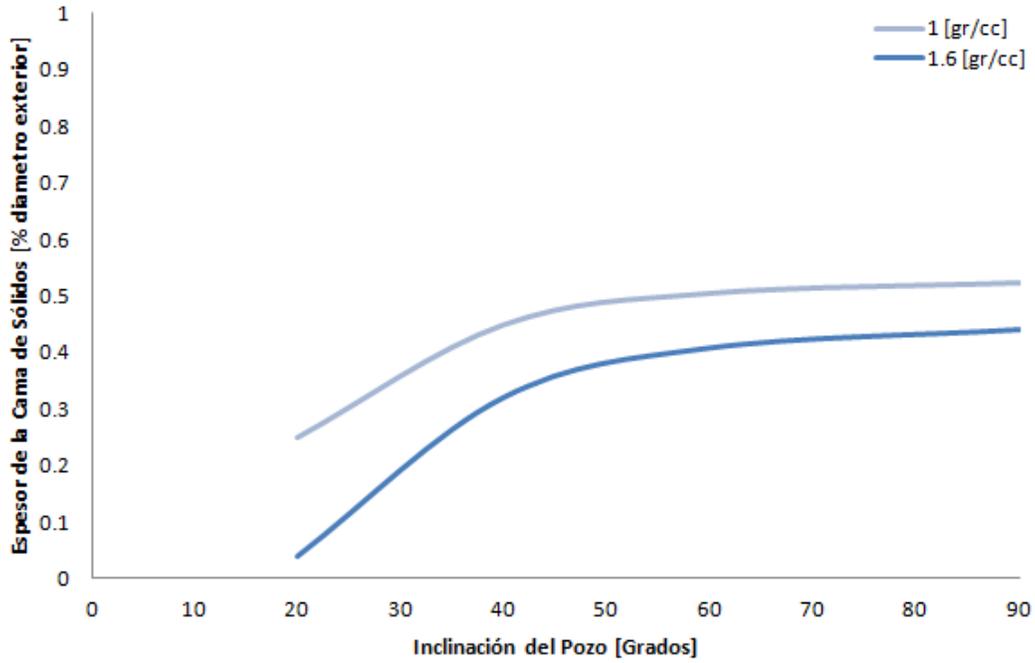
Gráfica 5.2.2.1 Espesor de la cama de sólidos en función de la velocidad del lodo de perforación y la inclinación del pozo.



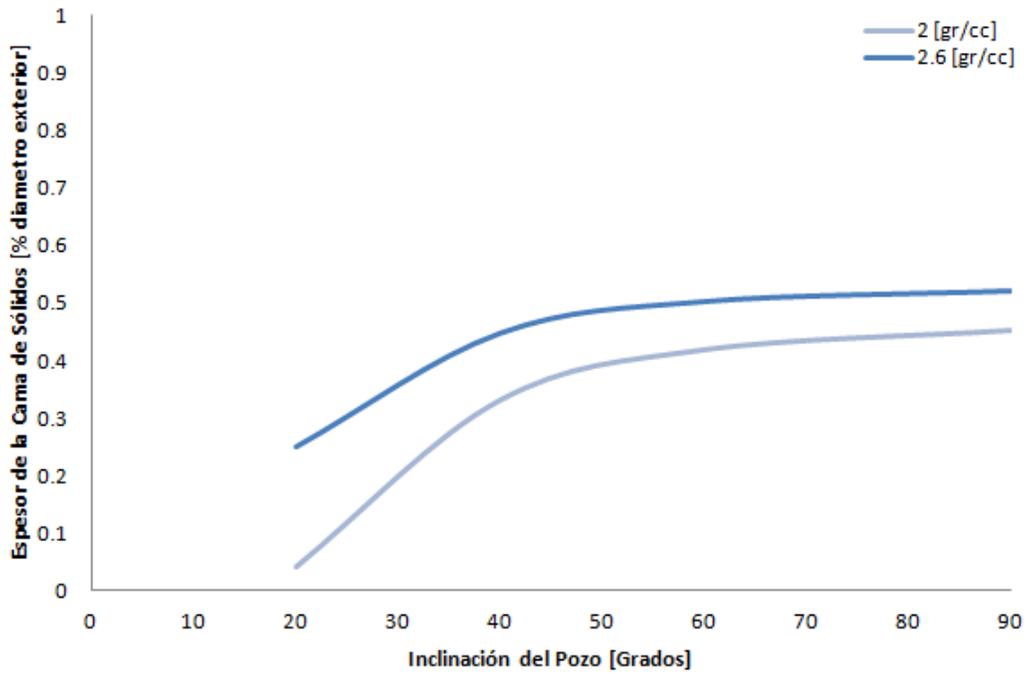
**Gráfica 5.2.2.2 Espesor de la cama de sólidos en función de la inclinación del pozo a distintas velocidades del lodo de perforación.**



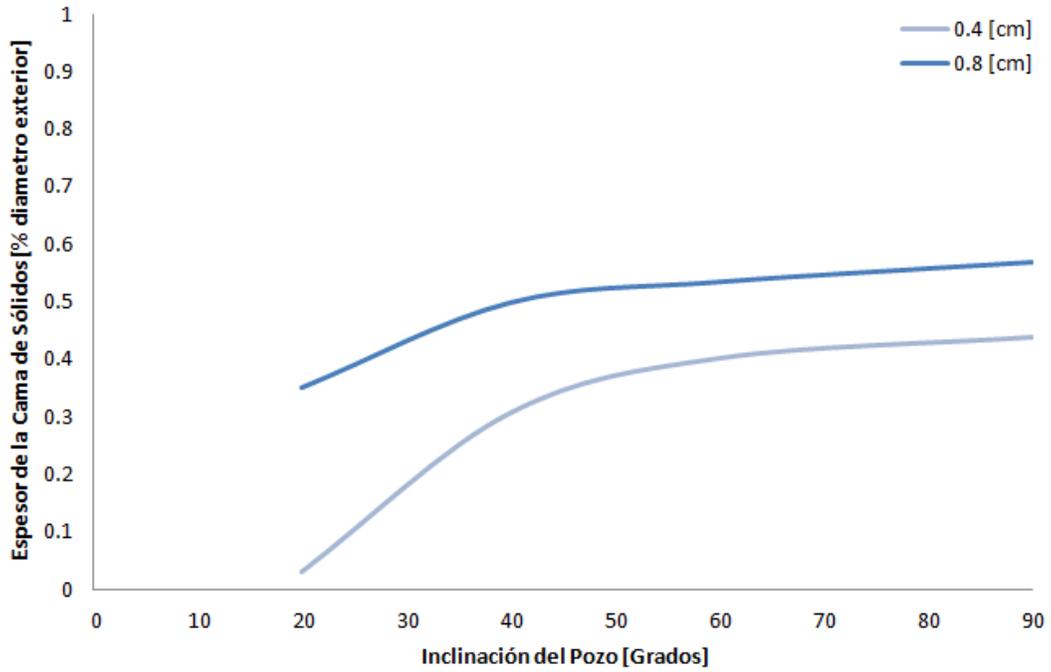
**Gráfica 5.2.3.1 Espesor de la cama de sólidos con tres diferentes fluidos a distintos ángulos de inclinación.**



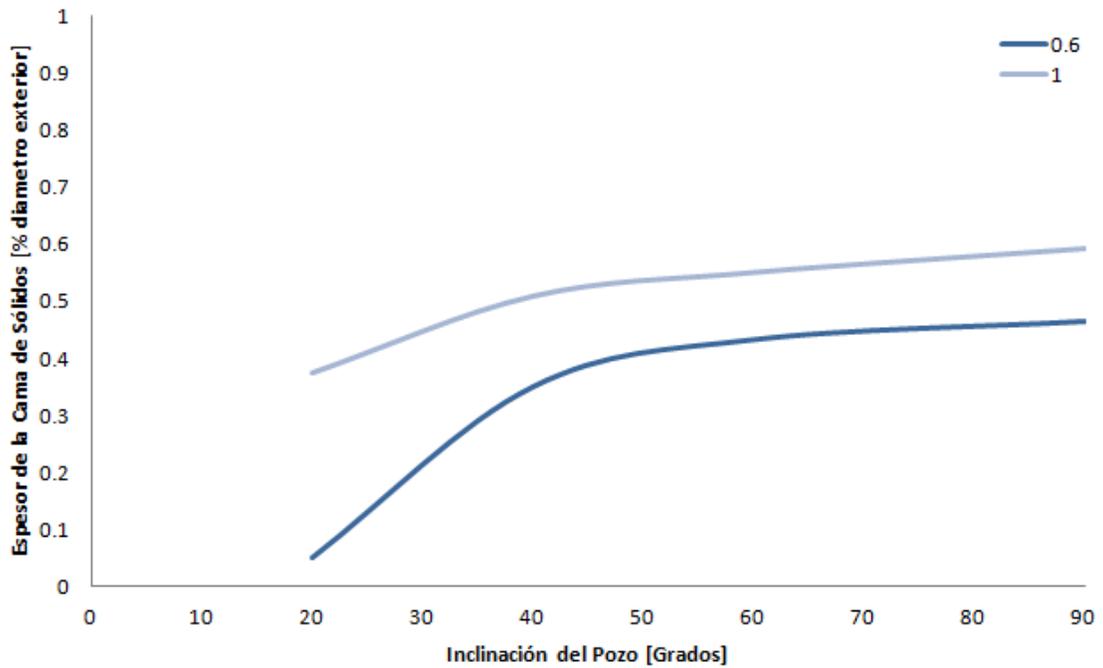
Gráfica 5.2.4.1 Espesor de la cama de sólidos a tres densidades diferente del fluido en circulación.



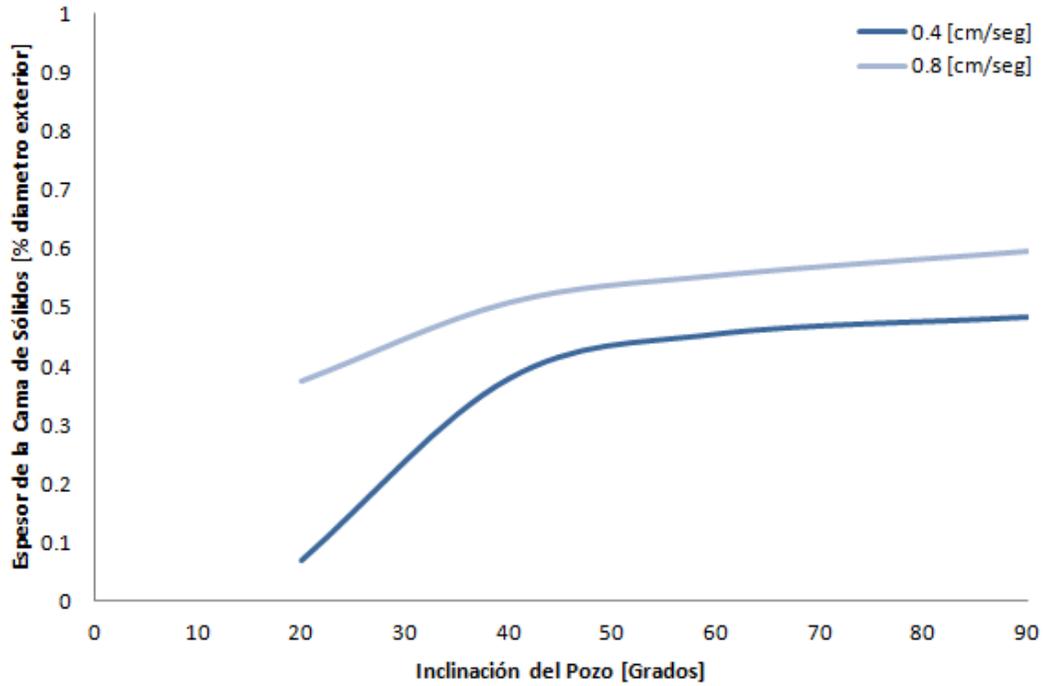
Gráfica 5.2.5.1 Espesor de la cama de sólidos a tres diferentes densidades del sólido.



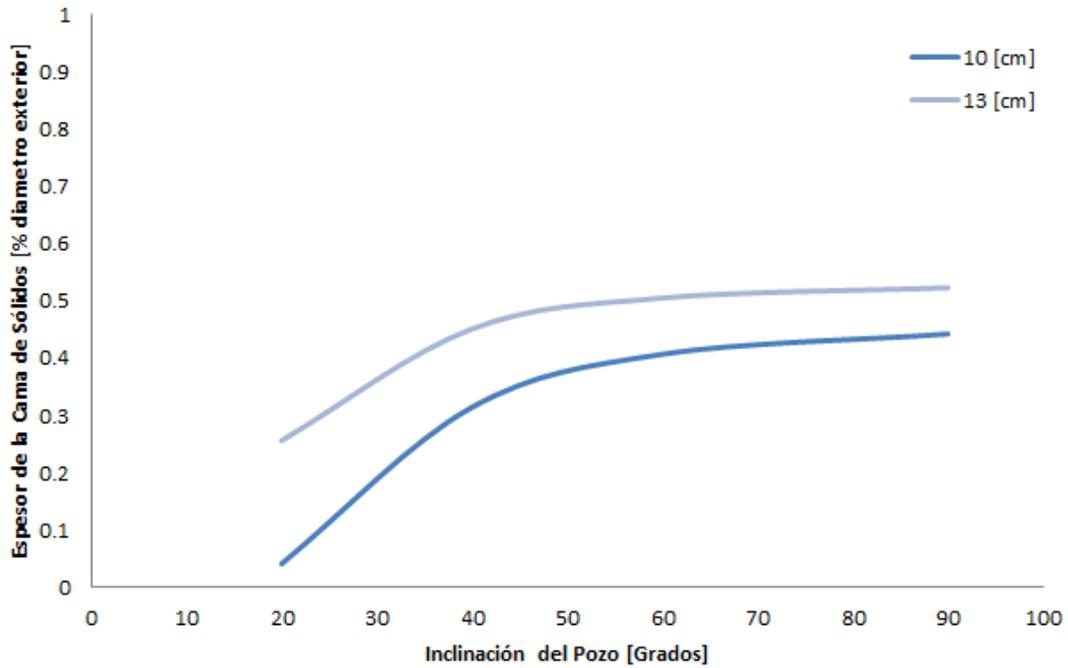
Gráfica 5.2.6.1 Espesor de la cama de recortes a diferentes diámetros de partícula sólida.



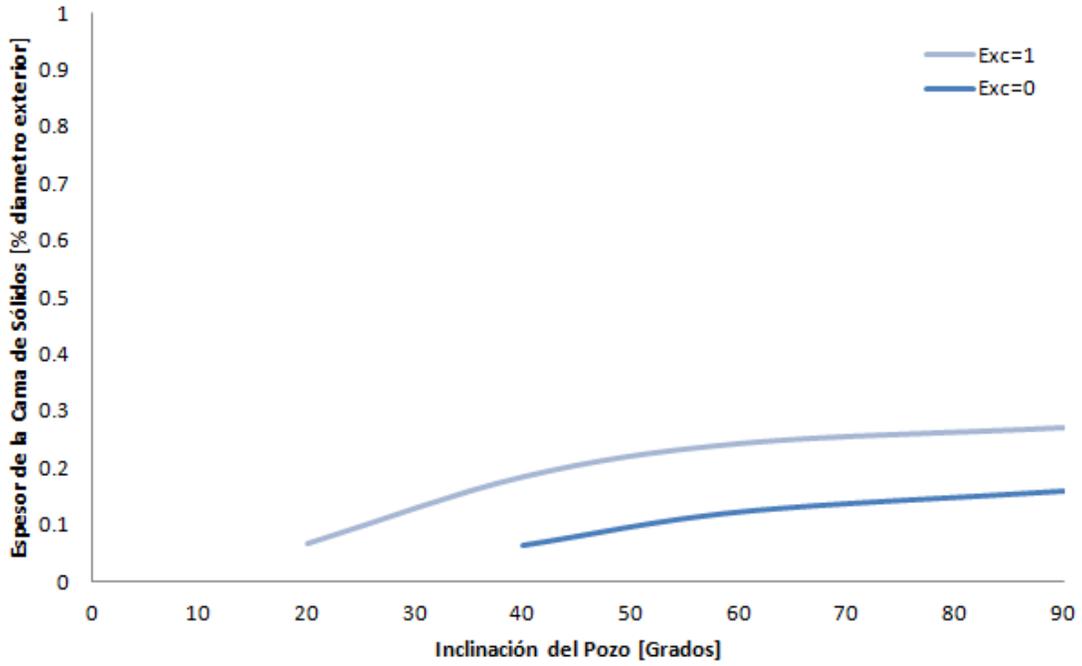
Gráfica 5.2.7.1 Espesor de la cama de recortes a diferentes esfericidades del recorte.



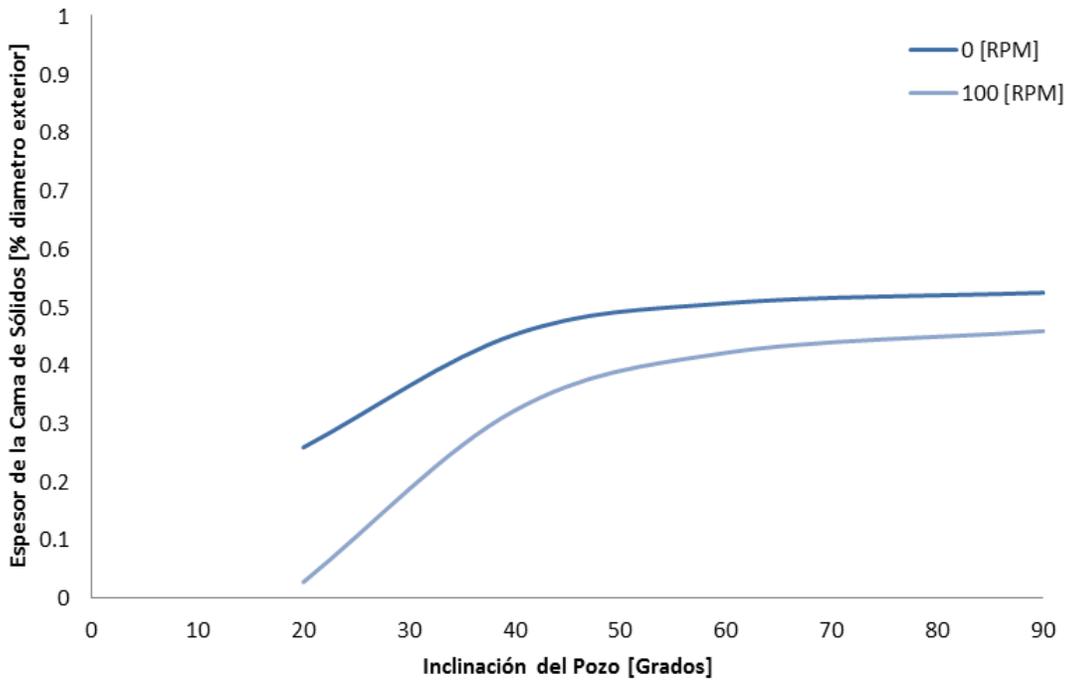
Gráfica 5.2.8.1 Espesor de la cama de recortes a diferentes velocidades de penetración de la barrena.



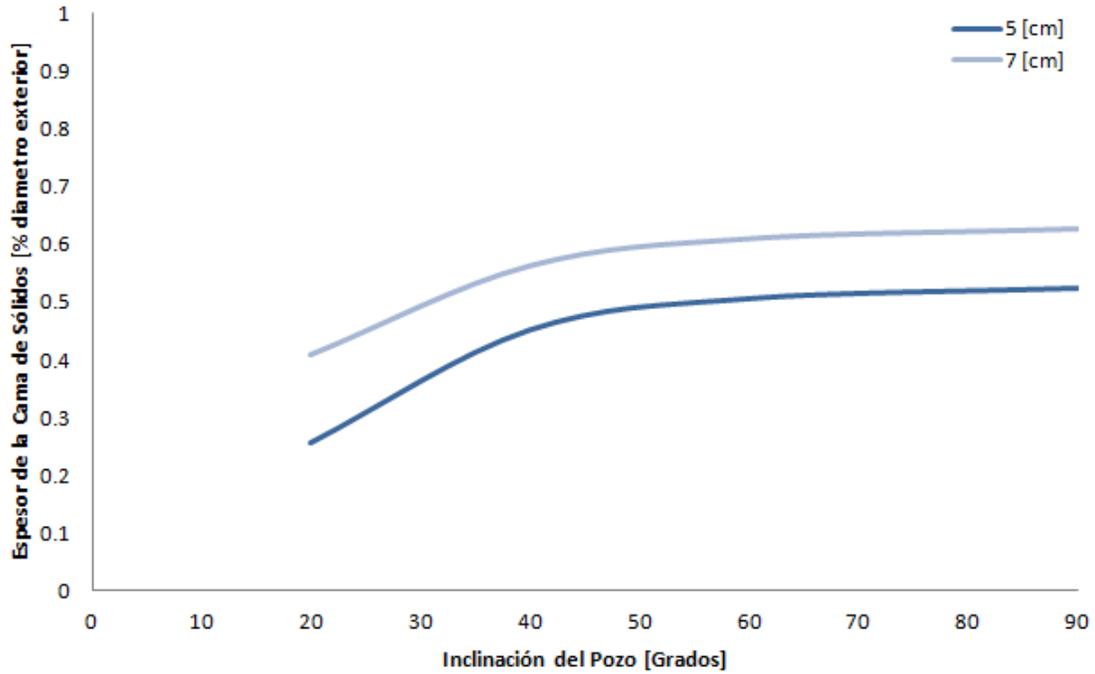
Gráfica 5.2.9.1 Espesor de la cama de recortes a diferentes diámetros de la barrena.



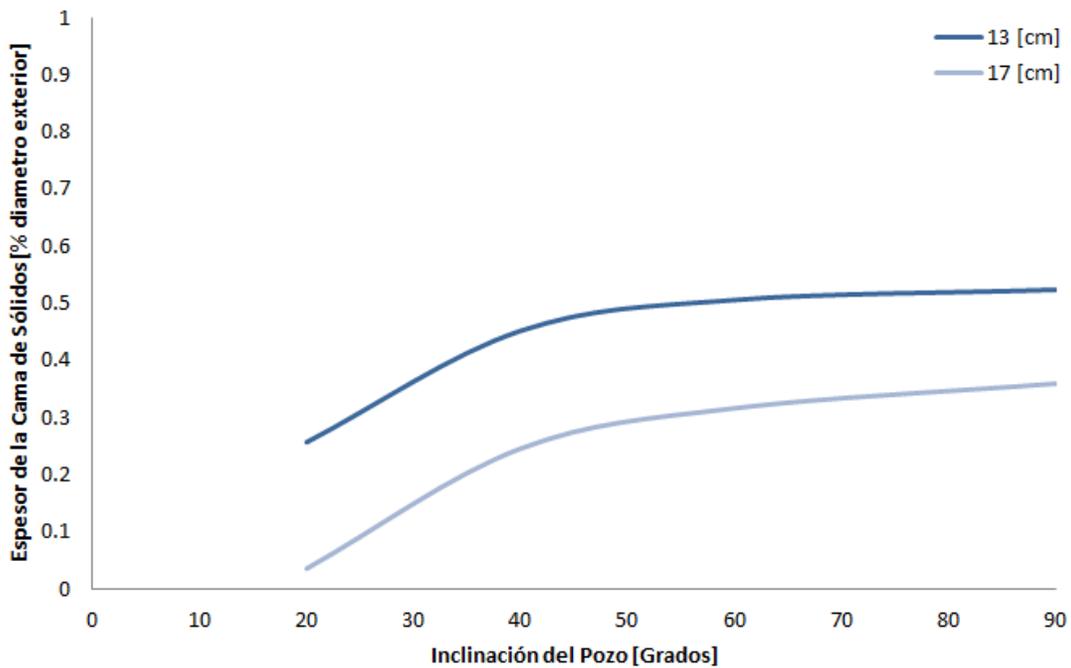
Gráfica 5.2.10.1 Espesor de la cama de sólidos a diferentes excentricidades de la tubería interna



Gráfica 5.2.11.1 Espesor de la cama de recortes a diferentes revoluciones de la tubería interna



**Gráfica 5.2.12.1 Espesor de la cama de recortes a diferentes diámetros de la tubería interna**



**Gráfica 5.2.12.2 Espesor de la cama de recortes a diferentes diámetros de tubería externa**

En general, se observa que el espesor de la cama de sólidos es satisfactoriamente sensible a los distintos parámetros involucrados en la perforación de un pozo desviado y que a su vez afectan la acumulación de sólidos en distinta magnitud. Se observa que el

ángulo de inclinación y la velocidad promedio del fluido de perforación son los principales parámetros que afectan la el transporte de sólidos en el espacio anular, pero también parámetros como la velocidad de penetración de la barrena o velocidad de giro de la sarta de perforación juegan un papel importante en el desarrollo de la cama de sólidos. También las propiedades físicas del fluido de perforación y de los recortes tienen efectos directos sobre la formación de la cama estacionaria de sólidos.

# **CAPÍTULO 6**

## **6. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO**

### **6.1 CONCLUSIONES**

En general, la acumulación de los recortes generados por la barrena en forma de cama estacionaria en las secciones altamente desviadas de un pozo es crítica. Aunque muchos parámetros se relacionan con una menor o mayor acumulación de recortes, es el ángulo de inclinación del pozo y la velocidad del lodo de perforación los parámetros que más inducen el asentamiento o la suspensión de los sólidos.

La velocidad del fluido de perforación en el espacio anular resulta ser el medio más efectivo para erosionar por completo la cama de sólidos estacionaria. Para la región de alta inclinación, de 60° a 90°, la velocidad mínima de transporte debe ser mayor a 150 *cm/seg*. Sin embargo existe la limitante de manejar velocidades muy altas de flujo en el pozo, ya que se incrementa la presión en el pozo y a su vez puede comprometer la estabilidad del agujero.

Por otro lado, las propiedades físicas del fluido de perforación tienen un efecto sobre el espesor de la cama de sólidos estacionaria como se demostró experimentalmente y por el modelo desarrollado, ya que ésta disminuye con el incremento de la densidad y la viscosidad del fluido, sin embargo, el incremento de estos parámetros tienen efectos directos sobre la presión en el pozo y la potencia requerida por las bombas. El incremento de la densidad del fluido de perforación ocasiona que la presión hidrostática aumente y el incremento de la viscosidad del fluido ocasiona mayor caída de presión en el flujo del lodo.

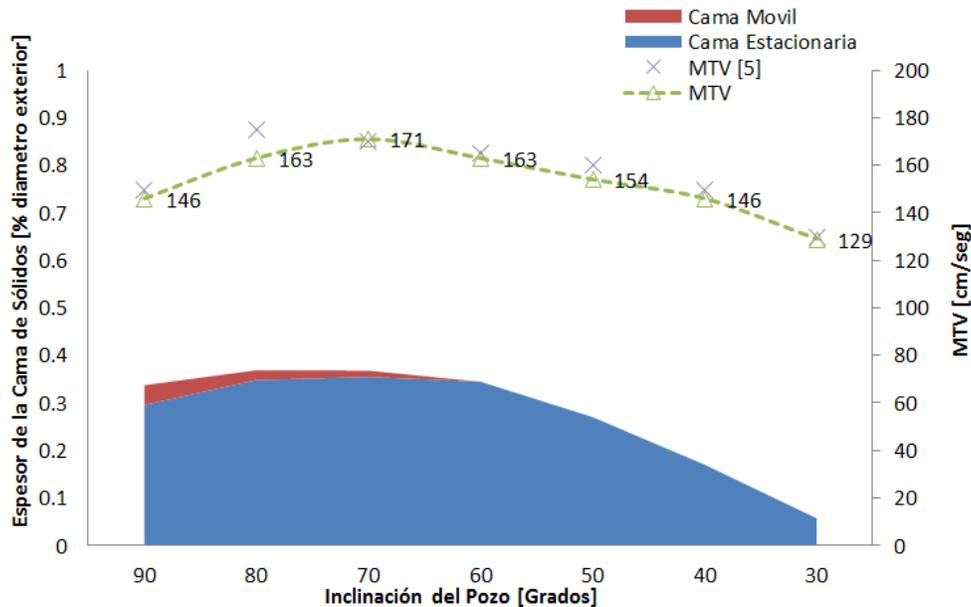
Sobre las propiedades físicas del recorte generado por la barrena, tanto experimentalmente como por el modelo, se muestra que al incrementar el diámetro y densidad del sólido, el espesor de la cama de recortes estacionaria incrementa y al disminuir la esfericidad, la cama es menos espesa. Sin embargo, muy poco se puede hacer para controlar estos parámetros a diferencia de los mencionados anteriormente. Se puede realizar un análisis sobre los recortes en superficie y obtener datos sobre el diámetro promedio, esfericidad y densidad de los recortes que dependen de la formación atravesada y características operativas de la barrena. Con estos datos se puede realizar un cálculo de la acumulación de sólidos más precisa.

Las propiedades operativas de la barrena de igual manera tienen efectos amplios en la acumulación de los sólidos en el pozo. Se observó que al incrementar la velocidad de penetración y diámetro de la barrena, el espesor de la cama estacionaria incrementa. La selección de la barrena depende del tipo de formación esperada y etapa a perforar, sin embargo, la reducción de la velocidad de penetración tendría el efecto de disminuir la

acumulación de sólidos en el pozo, bajo este esquema, también entraría en juego el factor costo y tiempo.

La geometría del espacio anular también tiene claros efectos sobre la formación de la cama estacionaria de sólidos. En general, a mayor área anular exista, el espesor de la cama estacionaria disminuirá. La geometría del espacio anular depende del diámetro de la sarta de perforación, diámetro del agujero o tubería externa y la excentricidad de la sarta de perforación y estos a su vez dependen de la etapa que se encuentre en perforación. La excentricidad de la sarta de perforación depende también de los esfuerzos que soporta la misma siendo crítica a altos grados de inclinación donde la tubería interna se encuentra descentrada y se ha demostrado que tiene efectos sobre la formación de la cama de sólidos.

Los resultados del modelo desarrollado han sido comparados directamente con las observaciones experimentales a diferencia de otros modelos publicados que han sido validados solo con resultados calculados. Por otro lado, se toman en cuenta parámetros operativos importantes que otros modelos omiten como; la velocidad de rotación, excentricidad de la sarta de perforación y esfericidad de los recortes. A demás, el desarrollo del modelo de tres y dos capas permite predecir el patrón de flujo de cama de sólidos estacionaria, móvil y en suspensión observado en los estudios experimentales en la sección de alta inclinación de 90° a 60° y el patrón de flujo de cama de sólidos y suspensión en la sección de transición de 60° a 30°, véase la gráfica 6.1.1. Cabe mencionar que también el modelo de dos capas puede ser empleado en la predicción del espesor de la cama de sólidos estacionaria en la sección altamente inclinada como se demostró en el apartado 5.1.



Gráfica 6.1.1 Aplicación de los modelos desarrollados en las secciones de alta inclinación y transición.

Como se demostró en el capítulo anterior, el modelo desarrollado para la predicción del espesor de la cama de sólidos estacionaria en pozos altamente desviados tiene un buen acercamiento a los resultados experimentales dando un valor de  $R^2$  del 90% y también es sensible a los parámetros de campo usados en la perforación de pozos como se demostró en el apartado **5.2**. De esta manera, el modelo desarrollado puede ser utilizado para analizar la eficiencia del transporte de recortes generados por la barrena en función de un diseño de pozo altamente desviado establecido. Si se predice la acumulación de sólidos en el espacio anular, se puede obtener la velocidad mínima de transporte MTV a la cual el pozo se mantenga limpio de recortes o el espesor de la cama sea despreciable, véase la gráfica **6.1.1**. Por otro lado, se pueden realizar pruebas sensitivas sobre los parámetros de operación para reducir lo más posible la acumulación de sólidos.

## **6.2 TRABAJO A FUTURO**

Durante el desarrollo del modelo se han hecho suposiciones físicas con el objetivo de simplificarlo, por lo tanto, en trabajos a futuro será necesario avanzar los modelos de dos y tres capas a un estado dependiente del tiempo para observar el comportamiento del espesor de la cama estacionaria en función del paso del tiempo. Los modelos transitorios pueden ser útiles para el estudio de pozos de alcance extendido donde estos efectos tienen mayor relevancia [24]. También es de interés modificar el modelo propuesto para predecir la cama estacionaria con fluidos compresibles en circulación, ya sea espumas o aireados. De esta manera también podría simularse el influjo de gases de la formación al pozo.

## NOMENCLATURA

*Sistema en unidades C.G.S:*

$a_1$  Área ocupada por la capa de flujo en suspensión [ $cm^2$ ]

$a_2$  Área ocupada por la capa de cama móvil [ $cm^2$ ]

$a_3$  Área ocupada por la capa de cama estacionaria [ $cm^2$ ]

$a_a$  Área del espacio anular [ $cm^2$ ]

$a_{bit}$  Área transversal de la barrena [ $cm^2$ ]

$\alpha$  Ángulo de inclinación del pozo medido desde la vertical [ $rad$ ]

$c_a$  Concentración anular total de la fase sólida. *Adimensional*

$c_1$  Concentración de sólidos en la capa de suspensión. *Adimensional*

$c_2$  Concentración de sólidos en la cama móvil. *Adimensional*[0.52]

$c_3$  Concentración de sólidos en la cama estacionaria. *Adimensional*[0.52]

$C_D$  Coeficiente de arrastre el sólido. *Adimensional*

$C_L$  Coeficiente de levantamiento del sólido. *Adimensional*

$d_p$  Diámetro del sólido [ $cm$ ]

$d_e$  Diámetro exterior [ $cm$ ]

$d_i$  Diámetro interior [ $cm$ ]

$d_{h1}$  Diámetro hidráulico de capa de flujo de sólidos en suspensión [ $cm$ ]

$d_{h2}$  Diámetro hidráulico de capa de flujo de sólidos en suspensión [ $cm$ ]

$e_e$  Distancia desde el eje coordenado  $x$  al centro de la tubería interna [ $cm$ ]

$\varepsilon$  Rugosidad de la cama de sólidos [ $cm$ ]

$\varepsilon^+$  Rugosidad adimensional de la cama de sólidos

$\varepsilon_p$  Coeficiente de difusión

$\frac{dP}{dL}$  Gradiente de presión  $\left[ \frac{dina}{cm} \right]$

$F_D$  Fuerza de arrastre  $[dina]$

$F_L$  Fuerza de levantamiento  $[dina]$

$F_2$  Fuerza de fricción seca entre la cama de sólidos móvil y la pared el pozo  $[dina]$

$F_{23}$  Fuerza de fricción seca entre la cama de sólidos móvil y estacionaria  $[dina]$

$F_w$  Fuerza de fricción seca debido al peso neto del sólido  $[dina]$

$F_\phi$  Fuerza de fricción seca debido a la transmisión de esfuerzos desde la interface  $[dina]$

$\eta$  Coeficiente de fricción dinámica seca  $[0.15]$

$\varphi$  Ángulo de reposo de la cama de sólidos  $[rad]$

$f_1$  Factor de fricción entre el flujo de sólidos en suspensión y la pared de la tubería.  
*Adimensional*

$f_{12}$  Factor de fricción interfacial entre la capa de flujo en suspensión y la cama de sólidos móvil. *Adimensional*

$f_2$  Factor de fricción entre la cama de sólidos móvil y la tubería. *Adimensional*

$f_{23}$  Factor de fricción interfacial entre la cama de sólidos móvil y la estacionaria.  
*Adimensional*

$g$  Aceleración de la gravedad de la tierra  $\left[ 981 \frac{cm}{s^2} \right]$

$k$  Índice de consistencia del fluido de perforación  $\left[ \frac{dina \cdot s^n}{cm^2} \right]$

$n$  Índice de comportamiento del fluido de perforación. *Adimensional*

$Q_f$  Gasto volumétrico de la fase líquida.  $\left[ \frac{cm^3}{s} \right]$

$r_{h1}$  Radio hidráulico de capa de flujo de sólidos en suspensión  $[cm]$

$r_{h2}$  Radio hidráulico de capa de flujo de sólidos en suspensión  $[cm]$

$\rho$  Densidad del fluido de perforación  $\left[ \frac{gr}{cm^3} \right]$

$\rho_p$  Densidad del sólido  $\left[ \frac{gr}{cm^3} \right]$

$\rho_1$  Densidad de la mezcla de flujo de sólidos en suspensión  $\left[ \frac{gr}{cm^3} \right]$

$\rho_2$  Densidad de la mezcla de cama de sólidos móvil  $\left[ \frac{gr}{cm^3} \right]$

$Re_1$  Numero de Reynolds de la capa de flujo de sólidos en suspensión. *Adimensional*

$Re_2$  Numero de Reynolds de la capa de la cama móvil de sólidos. *Adimensional*

$Re_p$  Numero de Reynolds de la partícula sólida. *Adimensional*

$s_{12}$  Perímetro interfacial entre la capa de suspensión y cama móvil  $[cm]$

$s_{23}$  Perímetro interfacial entre la capa de cama móvil y estacionaria  $[cm]$

$s_{1e}$  Perímetro mojado entre la capa de flujo en suspensión y la tubería externa  $[cm]$

$s_{1i}$  Perímetro mojado entre la capa de flujo en suspensión y la tubería interna  $[cm]$

$s_{2e}$  Perímetro mojado entre la capa de cama móvil y la tubería externa  $[cm]$

$s_{2i}$  Perímetro mojado entre la capa de cama móvil y la tubería interna  $[cm]$

$s_{3e}$  Perímetro mojado entre la capa de cama estacionaria y la tubería externa  $[cm]$

$s_{3i}$  Perímetro mojado entre la capa de cama estacionaria y la tubería interna  $[cm]$

$s$  Densidad relativa  $\frac{\rho_p}{\rho}$ . *Adimensional*

$\tau_1$  Esfuerzo de corte entre la tubería y la capa de flujo en suspensión  $\left[ \frac{\text{dina}}{\text{cm}^2} \right]$

$\tau_{12}$  Esfuerzo de corte interfacial entre la capa de flujo en suspensión y la cama móvil  $\left[ \frac{\text{dina}}{\text{cm}^2} \right]$

$\tau_2$  Esfuerzo de corte entre la tubería y la capa de cama móvil  $\left[ \frac{\text{dina}}{\text{cm}^2} \right]$

$\tau_{23}$  Esfuerzo de corte interfacial entre la capa de cama móvil y estacionaria  $\left[ \frac{\text{dina}}{\text{cm}^2} \right]$

$\theta$  Ángulo de inclinación del pozo medido desde la horizontal  $[\circ]$

$u_1$  Velocidad de la capa de flujo de sólidos en suspensión  $\left[ \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right]$

$u_2$  Velocidad de la capa de cama de sólidos móvil  $\left[ \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right]$

$\frac{du_2}{dy}$  Gradiente de velocidad del fluido sobre una partícula sólida  $\left[ \frac{1}{\text{s}} \right]$

$u_{ROP}$  Velocidad de penetración de la barrena  $\left[ \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right]$

$v_t$  Velocidad terminal de asentamiento del sólido  $\left[ \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right]$

$v_{ht}$  Velocidad terminal de asentamiento obstaculizado del sólido  $\left[ \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right]$

$y$  Distancia desde la superficie media de la cama de sólidos  $[\text{cm}]$

$y^+$  Distancia adimensional desde la superficie media de la cama de sólidos

$y_1$  Espesor de la capa de flujo de sólidos en suspensión  $[\text{cm}]$

$y_2$  Espesor de la cama sólidos móvil [*cm*]

$y_3$  Espesor de la cama de sólidos estacionaria. En el modelo de dos capas  $y_3 = y_2$  [*cm*]

# **APÉNDICE A**

## A. VELOCIDAD MÍNIMA DE LA CAMA DE SÓLIDOS MOVIL

La velocidad mínima de la cama de sólidos móvil está dada por la ecuación desarrollada en el apartado 4.4 como:

$$u_2 = \sqrt{\frac{4d_p(s-1)g \left( c_2 \left( \frac{y_2 - d_p}{d_p} \right) + 1 \right) \sin(\theta + \phi)}{3(C_D \cos \phi + C_L \sin \phi)}} \quad \text{Ec. A.1}$$

Donde el coeficiente de arrastre  $C_D$  es definido por Duan [17] mediante las ecuaciones:

$$R_{ep} < 0.2(2^n) \quad C_D = \frac{24}{R_{ep}}(2-n) \quad \text{Ec. A.2}$$

$$0.2(2^n) \leq R_{ep} < 24(2^n) \quad C_D = \frac{35.2}{\left( \frac{R_{ep}}{2^n} \right)^{1.03}} + n \left( 1 - \frac{20.9}{\left( \frac{R_{ep}}{2^n} \right)^{1.11}} \right) \quad \text{Ec.A.3}$$

$$24(2^n) \leq R_{ep} \leq 100(2^n) \quad C_D = \frac{37}{\left( \frac{R_{ep}}{2^n} \right)^{1.1}} + 0.25 + 0.36n \quad \text{Ec.A.4}$$

Y el coeficiente de levantamiento  $C_L$  es definido como [17]:

$$C_L = 2.47 \sqrt{\frac{d_p}{\text{Re}_p u_2} \frac{du_2}{dy}} \quad \text{Ec.A.5}$$

Donde en número de Reynolds está dado por [17]:

$$\text{Re}_p = \frac{\rho_f u_2^{2-n} d_p^n}{K} \quad \text{Ec.A.6}$$

La velocidad  $u_2$  y el gradiente de la velocidad  $\frac{du_2}{dy}$  sobre la partícula, véase las figuras 3.2.1, 3.2.2 y 4.4.1, están dados en función de la velocidad friccional  $u_f$  como [17]:

$$y^+ \leq 5$$

$$u_2 = \left(\frac{\rho}{k}\right)^{\frac{1}{n}} u_f^{2/n} y$$

**Ec.A.7**

$$\frac{du_2}{dy} = \left(\frac{\rho}{k}\right)^{\frac{1}{n}} u_f^{1+\frac{2-n}{n}}$$

$$5 < y^+ \leq 30$$

$$u_2 = -1.076u_f + 1.445\left(\frac{\rho}{k}\right)^{\frac{1}{n}} u_f^{2/n} y + 0.04885\left(\frac{\rho}{k}\right)^{2/n} u_f^{-1+\frac{4}{n}} y^2 + 0.0005813\left(\frac{\rho}{k}\right)^{3/n} u_f^{-2+\frac{6}{n}} y^3$$

$$\frac{du_2}{dy} = \left(\frac{\rho}{k}\right)^{\frac{1}{n}} u_f^{2/n} \left( 1.445 + \left(\frac{\rho}{k}\right)^{\frac{1}{n}} u_f^{-2+\frac{2}{n}} y \left( 0.0977u_f + 0.0017439\left(\frac{\rho}{k}\right)^{\frac{1}{n}} u_f^{2/n} y \right) \right)$$

**Ec.A.8**

$$y^+ > 30$$

$$u_2 = u_f \left( 5.5 + 2.5 \ln \left[ \left(\frac{\rho}{k}\right)^{\frac{1}{n}} u_f^{-1+\frac{2}{n}} y \right] \right)$$

**Ec.A.9**

$$\frac{du_2}{dy} = \frac{2.5u_f}{y}$$

$$\varepsilon^+ > 70$$

$$u_2 = u_f \left( 2.44 \ln \left[ \frac{y}{\varepsilon_p} \right] + 8.5 \right)$$

**Ec.A.10**

$$\frac{du_2}{dy} = \frac{2.44u_f}{y}$$

Donde la altura adimensional de la superficie media de la cama estacionaria al centro de la partícula  $y^+$  y la rugosidad adimensional  $\varepsilon_p^+$  están dados por:

$$y^+ = y u_f^{\frac{2-n}{n}} \left(\frac{\rho}{k}\right)^{\frac{1}{n}}$$

**Ec.A.11**

$$\varepsilon^+ = \varepsilon u_f^{\frac{2-n}{n}} \left( \frac{\rho}{k} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{Ec.A.12}$$

La altura de la superficie media de la cama estacionaria al centro de la partícula  $y$  y la rugosidad  $\varepsilon$  están definidos como:

$$y = \frac{d_p}{2} (\cos[\phi]) \quad \text{Ec.A.13}$$

$$\varepsilon = \frac{d_p}{2} (1 + \cos[\phi]) \quad \text{Ec.A.14}$$

Finalmente al sustituir las ecuaciones **A.7** a **A.10**, según sea el caso, en las ecuaciones **A.1**, **A.2** y **A.3** éstas quedan definidas en función de la velocidad friccional  $u_f$  la cual es resuelta de forma numérica. Al obtener el valor  $u_f$  podemos hallar la velocidad mínima de la cama estacionaria  $u_2$  correspondiente.

## REFERENCIAS

1. S.D. Joshi: "Horizontal Wells: Successes and Failures", Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 33 No. 9, 1994.
2. L.E. Pendleton:"Horizontal Drilling Review", SPE 23535, 1991.
3. T. Nazari et al: "Review of Cutting Transport in Directional Well Drilling", SPE 132372, 2010.
4. P.H. Tomren et al: "Experimental Study of Cutting Transport in Directional Wells", SPE 12123, 1983.
5. J.T. Ford et al: "Experimental Investigation of Drilled Cuttings Transport in Inclined Boreholes", SPE 20421, 1990.
6. Sumer M. Peker:"Solid-liquid Two Phase Flow", ELSEVIER, ISBN: 978-0-444-52237-5, 2008.
7. V.C. Kelessidis:"Flow Patterns and Minimum Suspension Velocity for Efficient Cuttings Transport in Horizontal and Deviated Wells in Coiled Tubing Drilling", SPE 81746, 2004.
8. P. Doron y D. Barnea: "A Three Layer Model for Solid – Liquid Flow in Horizontal Pipes", Int. J. Multiphase Flow Vol. 9 No 6, 1993.
9. P. Doron et al: "Slurry Flow in Horizontal Pipes – Experimental and Modeling", Int. J. Multiphase Flow Vol. 13 No 4, 1986.
10. A. L. Martins y C. Costapinto Santana: "Evaluation of Cutting Transport in Horizontal and Near Horizontal Wells – A New Dimensionless Approach", SPE 23643, 1992.
11. J.A. "Jim" Short: "Introduction to Directional and Horizontal Drilling", Tulsa, Oklahoma, 1993.
12. Octavio Rodriguez Jaimes: "Perforación de Alcance Extendido", Tesis profesional, UNAM, 2009.
13. Slavomir S. Okrajni: "The Effects of Mud Rheology on Annular Hole Cleaning in Directional Wells", SPE 14178, 1986.
14. Mingqin Duan et al The Effect of Drill Pipe Rotation on Pressure Losses and Fluid Velocity Profile in Foam Drilling", SPE 114185, 2008.
15. Sze-Foo Chien: "Settling Velocity of Irregularly Shaped Particles",SPE 26121,1994.
16. Thomas, D.G.: "Transport Characteristics of Suspensions: Relation of Hindered Settling Floc Characteristics to Rheological Parameters," AIChE Vol.9, 1963.
17. M. Duan et al: "Critical Conditions for Effective Sand – Sized Solids Transport in Horizontal and High Angle Wells", SPE 106707, 2007.
18. Taylor G.: "The Dispersion of Matter in Turbulent Flow Through a pipe", Proc. R. Soc, 1954.
19. Hyun Cho: "Development of a Three Segment Hydraulic Model for Cuttings Transport in Horizontal and Deviated Wells", PhD Dissertation, University of Oklahoma, 2001.
20. R. Darby:"Chemical Engineering Fluid Mechanics", ISBN: 0-8247-0444-4, 2001.
21. T.D. Reed et al:"A New Model for Laminar, Transitional and Turbulent Flow of Drilling Muds", SPE 25456, 1993.

22. A. Ramadan et al: "A Three Layer Modeling Approach for Solid Transport in Horizontal and Inclined Channels ", Chemical Engineering Science 60 (2005) 2557 – 2570, 2004.
23. Shigemi Naganawa:"Simulating Transient Behavior of Cutting Transport Over Whole Trajectory of ERW", SPE 103923, 2006.
24. Bagnold R. A.:" Experiments on Gravity – Free Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear", Proc. R. Soc. Lond. A225, 1954.
25. L. Zhou: "Hole Cleaning During UBD in Horizontal and inclined Wellbore", SPE 98926, 2006.
26. A. Ramadan et al: "A Mechanistic Model to Determine the Critical Flow Velocity Required to Initiate the Movement of Spherical Bed Particle in Inclined Channels", Chemical Engineering Science No. 58 2153-2163, 2001.