



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA**

FACULTAD DE INGENIERIA

**MODELO HIDRAULICO PARA LA PLANEACION DE LA  
PERFORACION DE POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO  
EN LA CUENCA TERCIARIA DE VERACRUZ**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERIA**

**PETROLERA Y GAS NATURAL - PERFORACION**

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

**JESUS SANCHEZ MARTINEZ**

**TUTOR:**

**DR. RUBEN NICOLAS LOPEZ**

**2008**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Carlos Pérez Tellez  
Secretario: Dr. Porfirio Mendizábal Cruz  
Vocal: Dr. Rubén Nicolás López  
1<sup>er.</sup> Suplente: M.I. Joaquín Mendiola Sánchez  
2<sup>do.</sup> Suplente: M. en C. Jaime Ortiz Ramírez

Lugar o Lugares donde se realizó la tesis:

Ciudad Universitaria, México, D.ISTRITO FEDERAL

**TUTOR DE TESIS:**

RUBÉN NICOLÁS LÓPEZ



---

**FIRMA**

## AGRADECIMIENTOS

*Gracias a Dios por permitirme terminar otra etapa de mi vida.*

*Gracias a Petróleos Mexicanos por darme su apoyo y la oportunidad de superarme profesionalmente, en especial a la Unidad de Perforación y Mantenimiento de Pozos que a través de la Unidad Operativa de Perforación Veracruz hicieron posible la realización de esta meta.*

*Gracias a los Ingenieros:*

*Gumaro Herrera Huerta (q.e.p.d.)*

*Javier Rodríguez Delfín*

*Javier Páramo García*

*Angel Montero Domínguez*

*Por sus consejos y apoyo en la realización de este trabajo.*

*Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma mater y a la Facultad de Ingeniería por haberme permitido regresar para continuar con mi formación.*

*Gracias a los sinodales por dedicar un poco de su tiempo y conocimientos para enriquecer este trabajo.*

## ÍNDICE

Pág.

### RESUMEN

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA TERCIARIA DE VERACRUZ</b>                       | <b>1</b>  |
| 1.1      | Geografía y descripción   | 1         |
| 1.2      | Ventana Operacional de los Gradientes de Poro y Fractura                    | 6         |
| 1.3      | Estadísticas de la Producción de Gas  | 7         |
| 1.4      | Estadísticas de Pozos Perforados  | 9         |
| 1.5      | Problemas Encontrados   | 11        |
| 1.6      | Necesidades   | 14        |
| <b>2</b> | <b>POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO</b>   | <b>15</b> |
| 2.1      | Descripción   | 15        |
| 2.2      | Limitaciones  | 20        |
| 2.3      | Características de los equipos de perforación                               | 21        |
| 2.4      | Beneficios de utilizar alcance extendido en la Cuenca Terciaria de Veracruz | 22        |
| 2.5      | Aspecto económico   | 22        |
| 2.6      | Mecánica de rocas   | 23        |
| <b>3</b> | <b>EXPERIENCIA DE POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO EN OTROS PAISES</b>            | <b>24</b> |
| 3.1      | Mar del Norte Campo Wytch Farm  | 24        |
| 3.1.1    | Descripción del Campo Wytch Farm  | 24        |
| 3.1.2    | Propuestas de perforación campo Wytch Farm                                  | 26        |
| 3.1.3    | Pozo Wytch Farm M-16Z   | 28        |
| 3.2      | Mar del Sur de China Campo Xijiang 24-3                                     | 32        |
| 3.2.1    | Descripción del campo Xijiang 24-3  | 32        |
| 3.2.2    | Propuestas de perforación Campo Xijiang 24-3                                | 33        |
| 3.2.3    | Pozo Xijiang 24-3 A-14  | 37        |
| <b>4</b> | <b>IMPORTANCIA DE LA LIMPIEZA DE AGUJERO</b>                                | <b>48</b> |
| 4.1      | Factores que afectan en la limpieza de agujero                              | 49        |
| 4.2      | Cama de recortes de perforación   | 52        |
| 4.3      | Ejemplo de limpieza crítica de agujero                                      | 53        |
| <b>5</b> | <b>MODELOS HIDRÁULICOS PARA LA LIMPIEZA DE AGUJEROS</b>                     | <b>56</b> |
| 5.1      | Patrones de flujo mezcla liquido-sólido del modelo de dos capas             | 56        |
| 5.1.1    | Patrón de flujo con cama fija   | 57        |
| 5.1.2    | Patrón de flujo con cama móvil  | 58        |
| 5.1.3    | Patrón de flujo completamente suspendido                                    | 59        |
| 5.2      | Modelo de dos capas   | 61        |
| 5.2.1    | Predicción del factor de fricción interfacial                               | 65        |
| 5.2.2    | Impacto de la Reología  | 68        |
| 5.3      | Modelo de dos capas modificado  | 68        |
| 5.4      | Patrones de flujo mezcla liquido-sólido del modelo de tres capas            | 71        |
| 5.4.1    | Patrón de flujo de la etapa de flujo en tres capas                          | 71        |
| 5.4.2    | Patrón de flujo de la etapa de flujo en dos capas                           | 72        |
| 5.4.3    | Patrón de flujo de la etapa de flujo en una sola capa                       | 73        |
| 5.5      | Modelos de tres capas   | 73        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>6</b> | <b>DESARROLLO DEL MODELO HIDRÁULICO PROPUESTO PARA LA LIMPIEZA DE AGUJEROS EN LA PLANEACIÓN DE POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO EN LA CUENCA Terciaria de Veracruz</b> | <b>77</b>  |
| 6.1      | Criterio de cama móvil de recortes de perforación  | 77         |
| 6.1.1    | Máxima concentración en la cama de recortes debido a partículas esféricas  | 78         |
| 6.1.2    | Calculo de las fuerzas presentes en el movimiento de una cama de partículas  | 79         |
| 6.1.3    | Suma de momento de las fuerzas respecto al punto de origen   | 84         |
| 6.1.4    | Velocidad de asentamiento  | 89         |
| 6.1.5    | Calculo de la velocidad mínima de la cama de recortes de perforación   | 90         |
| 6.2      | Balance de materia considerando gasto másico y gasto volumétrico   | 92         |
| 6.2.1    | Balance de cantidad de movimiento  | 94         |
| 6.2.2    | Numero de Reynolds   | 98         |
| 6.2.3    | Fuerza normal y fuerza máxima de la cama de recortes   | 99         |
| 6.3      | Ecuación de concentraciones  | 104        |
| 6.3.1    | Solución propuesta para la ecuación de concentraciones   | 106        |
| 6.4      | Área de la suspensión  | 108        |
| 6.4.1    | Área de la suspensión caso I   | 109        |
| 6.4.2    | Área de la suspensión caso II  | 110        |
| 6.4.3    | Área de la suspensión caso III   | 111        |
| 6.5      | Calculo de los perímetros de la cama de recortes, de la suspensión y de la interfase   | 113        |
| 6.5.1    | Perímetros caso I  | 113        |
| 6.5.2    | Perímetros caso II   | 115        |
| 6.5.3    | Perímetros caso III  | 119        |
| 6.6      | Concentración de la suspensión   | 120        |
| 6.6.1    | Concentración de la suspensión caso I  | 120        |
| 6.6.2    | Concentración de la suspensión caso II   | 126        |
| 6.6.3    | Concentración de la suspensión caso III  | 127        |
| 6.7      | Calculo de la altura de la cama  | 128        |
| 6.8      | Estado de la cama de recortes  | 129        |
| <b>7</b> | <b>ANÁLISIS Y COMPROBACION DE LOS RESULTADOS</b>   | <b>130</b> |
| 7.1      | Información requerida para realizar las corridas   | 130        |
| 7.2      | Comparación de resultados del modelo propuesto   | 131        |
| 7.3      | Altura de la cama de recortes contra ángulo de inclinación   | 131        |
| 7.4      | Trayectoria direccional del ejercicio analizado  | 133        |
| 7.5      | Resultados de la corrida del pozo Arquimia 31  | 135        |
| 7.6      | Densidades de la Litología   | 139        |
| <b>8</b> | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>  | <b>140</b> |
| 8.1      | Conclusiones   | 140        |
| 8.2      | Recomendaciones  | 141        |
|          | <b>APÉNDICE A</b> Secuencia de cálculo   | <b>142</b> |
|          | <b>APÉNDICE B</b> Código del programa de cómputo del modelo hidráulico   | <b>151</b> |
|          | <b>BIBLIOGRAFÍA</b>  | <b>159</b> |

## RESUMEN

Esta investigación se enfocó principalmente a un entendimiento más profundo del comportamiento de las partículas en la cama de recortes, para ayudar en la planeación de la perforación de pozos de alcance extendido.

El modelo propuesto es teórico y se basa en el modelo de dos capas, teniendo en el agujero del pozo la tubería de perforación centrada, la capa superior contiene una concentración de recortes de perforación en suspensión y la inferior es la cama de recortes. En base a lo anterior se predijo el comportamiento y estado de movimiento de la cama de recortes. Esto permitió conocer la velocidad mínima de acarreo de recortes que garantice la limpieza del agujero en pozos de alcance extendido.

Se propuso una solución para la ecuación de difusión de partículas en coordenadas rectangulares, resolviéndola para la concentración de la suspensión y calculando la altura de la cama de recortes de perforación, lo anterior como resultado de un promedio integral, la ecuación que resultó quedó en función de una integral con exponentes variables y se resolvió por medio de la regla trapezoidal.

Se elaboró un programa de cómputo donde por medio de iteraciones se calculó la altura de la cama de recortes, la primera iteración se hizo con el valor de la velocidad mínima de la cama de recortes y con ello se calcularon los demás valores del sistema de ecuaciones, proporcionando al final si esta cama de recortes está en movimiento, fija o si fue erosionada por las condiciones de perforación.

---

# 1. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA TERCIARIA DE VERACRUZ

En este capítulo se describe parte del Organigrama de Pemex Exploración y Producción; del cual depende el Activo Integral Veracruz, y donde se encuentra la Cuenca Terciaria de Veracruz, mencionando la producción de gas de los últimos años tanto en la Región Norte como en las otras tres Regiones (Sur, Marina Suroeste y Marina Noreste). Asimismo, los pozos mas relevantes que se han perforado en esa zona por la Unidad Operativa de Perforación Veracruz, y desde el punto de vista geológico se describen las estructuras que conforman dicha cuenca, finalmente se mencionan las problemáticas que se han encontrado al perforar la zona y las necesidades existentes hoy en día.

## 1.1. GEOGRAFÍA Y DESCRIPCIÓN

La cuenca terciaria de Veracruz está localizada al este central de la República Mexicana, en el estado de Veracruz, tiene un área de 18,000 km, es limitada: al oeste por un corrimiento de cinturón plegado (productor de gas húmedo amargo, condensado y poco aceite de las calizas del Mesozoico), al norte por roca volcánica reciente, al oeste por el talud continental y hacia el sur esta llega hasta la Cuenca del Istmo Saline de la Región Sur de Pemex. La cuenca es una de las cinco de la Región Norte, las cuales son: Sabinas, Burgos, Tampico, Misantla y Veracruz. De las cuales Tampico y Misantla son productoras de aceite y Sabinas, Burgos y Veracruz son productoras de gas.

La **Figura 1.1** es un mapa geográfico de la Cuenca Terciaria de Veracruz, donde se aprecia de izquierda a derecha las zonas elevadas y montañosas hasta llegar a la ciudad de Córdoba (marcada con una línea verde punteada) donde se tiene las formaciones cretácicas, teniendo como principales campos productores a: Matapionche, Mecayucan y Cópite, sigue una línea de triángulos rojos que es donde inicia la transición del cretácico al terciario, teniendo al campo Angostura, productor de aceite y gas, continuando con la figura se tiene una línea roja que es la que limita la Cuenca Terciaria de Veracruz, teniendo formaciones 100% terciarias. En este mapa también se aprecian las zonas de ríos y lagunas de la cuenca, haciendo mas difícil su explotación desde el punto de vista ambiental y ecológico, por lo que se debe tomar en cuenta este aspecto en la planeación de los proyectos.





Figura 1.1. Mapa de la Cuenca Terciaria de Veracruz.

## MARCO TECTÓNICO ESTRATIGRÁFICO

Durante el Cretácico el marco estratigráfico quedó delineado con una extensa plataforma carbonatada en la porción occidental (la Plataforma de Córdoba) y rampas, márgenes abruptos de talud con una profunda depresión en la porción oriental, actual Cuenca de Veracruz (**Figura 1.2**). La cuenca de Veracruz ha estado afectada por dos grandes fallas de desplazamiento de rumbo: 1) La Falla Novillero-Vibora-Chachalacas (NVC) y; 2) La Falla Tuxtlas-Anegada-Santa Ana (TAS); desde el principio de la historia geológica de la región, el registro geológico en rocas del Cretácico es conocido solo en la porción norte de la cuenca en donde los pozos Nácar-1 y Paso de Ovejas-2 atravesaron los carbonatos de la plataforma y penetraron en el basamento, en el resto de la cuenca se tiene una enorme subsidencia y el registro geológico solo es claro para rocas del Terciario<sup>[1]</sup>.

La **Figura 1.2** muestra una imagen satelital de la cuenca terciaria, con un rasgo tectónico de rumbo NW SE donde divide la Región de Veracruz en 2 Provincias: La Plataforma de Córdoba y la Cuenca de Veracruz.

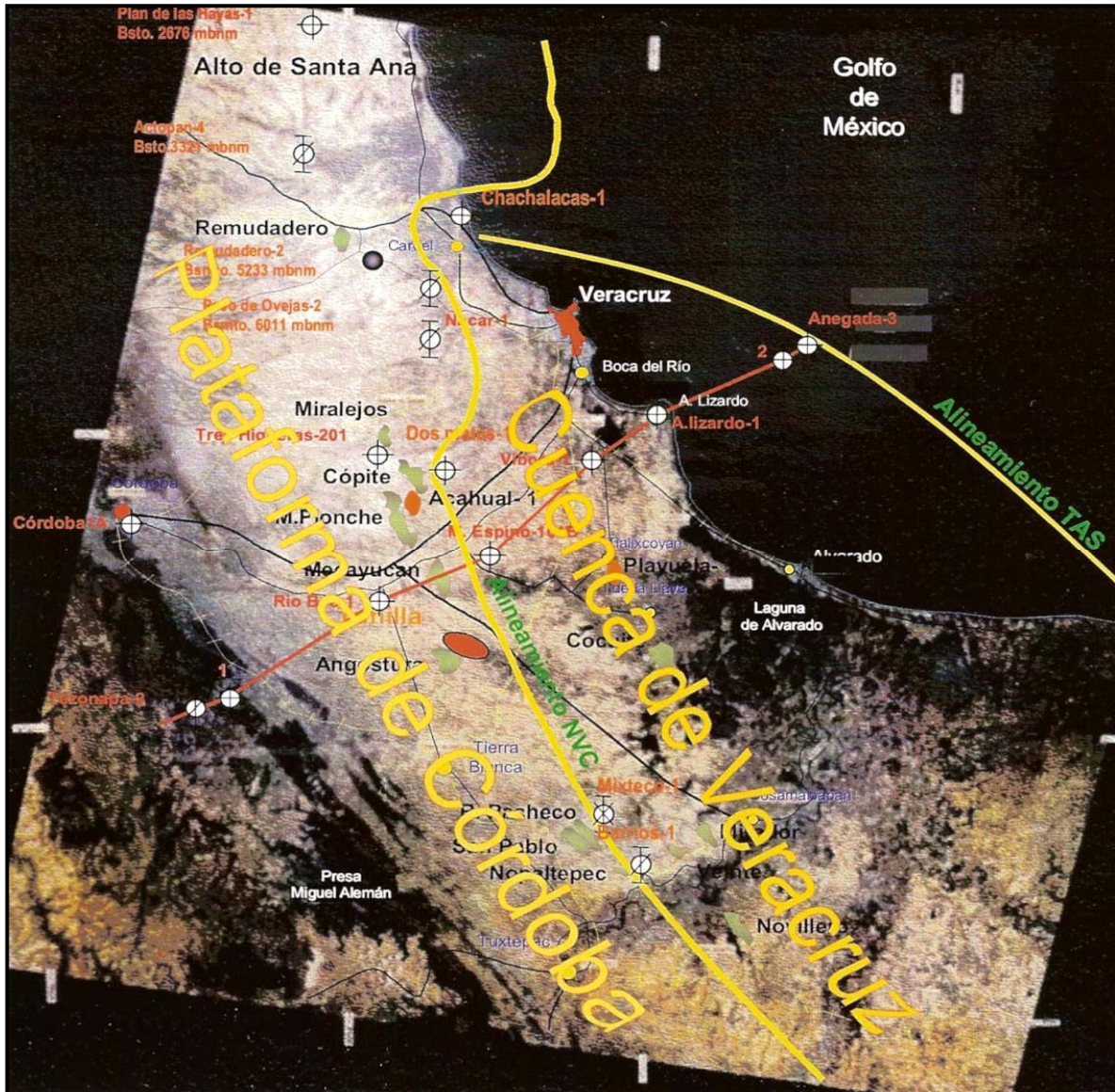


Figura 1.2. Imagen Satelital Landsat TM P24-R47.

La depresión central en la Cuenca de Veracruz es asimétrica, estuvo controlada y limitada por las fallas NVC y TAS, esta depresión se profundiza y amplía hacia el Sureste del Campo Novillero, siendo más somera y angosta hacia el Norte entre los Pozos Víbora-1 y Antón Lizardo-1. Desde el punto de vista de deformación y geometría estructural se presentan diferencias muy marcadas entre las estructuras de la Plataforma de Córdoba, La Cuenca Terciaria de Veracruz y Plataforma Continental, su distribución geográfica se presenta en la **Figura 1.3**, mostrando la dirección de los esfuerzos principales dominantes en el área, las flechas gruesas indican la dirección y sentido del esfuerzo y los segmentos de línea las secciones incluidas.



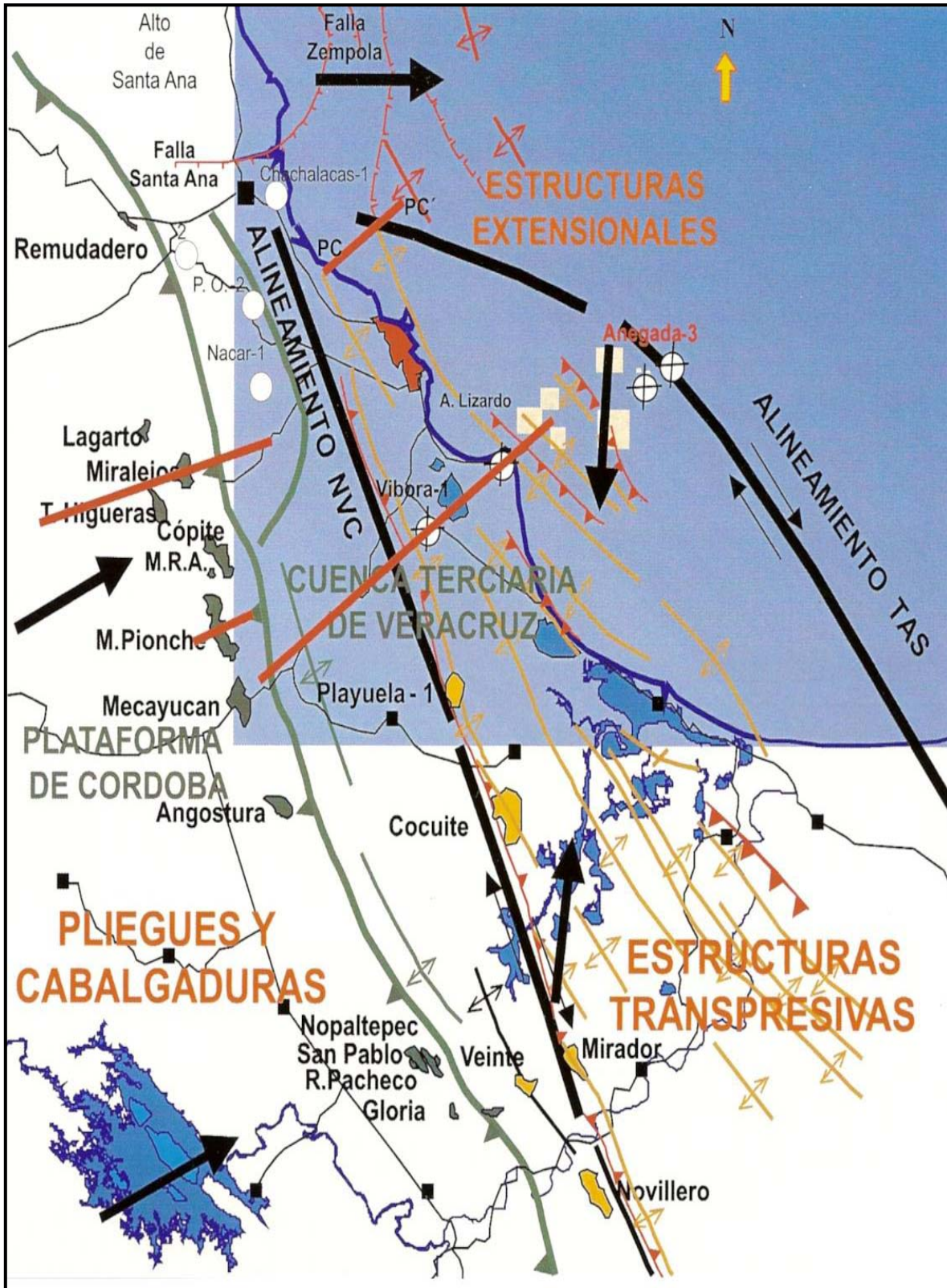
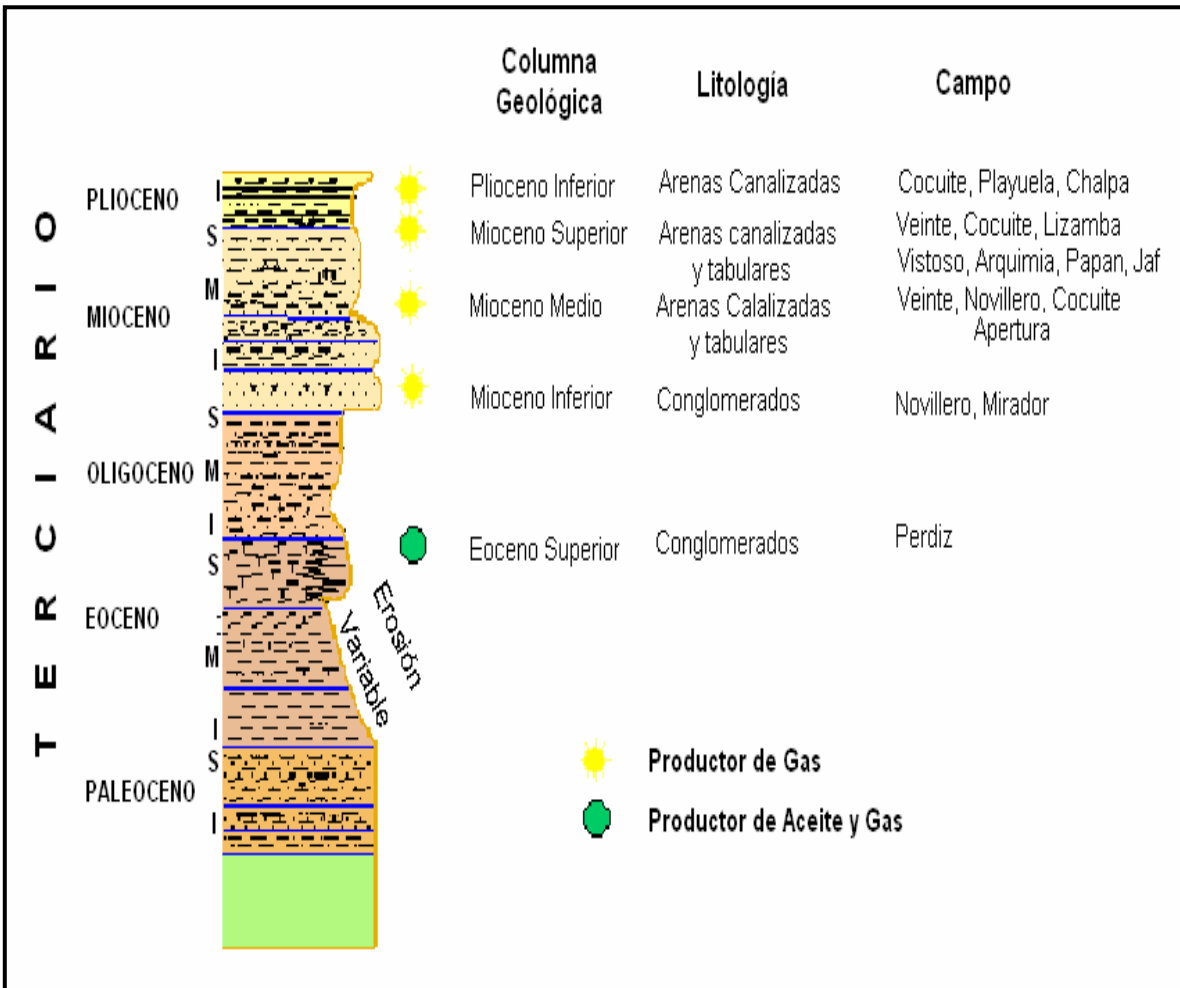


Figura 1.3. Distribución geográfica de los estilos estructurales.

## COLUMNA GEOLOGICA

En la **Figura 1.4** se describe la columna geológica de la Cuenca Terciaria de Veracruz, donde hasta Febrero de 2008 solo se ha encontrado aceite en dos campos, el Perdiz y el Angostura. En este tipo de pozos se perforan conglomerados e intercalaciones de arenas. Por lo general estos cuerpos son atravesados con barrenas tricónicas las cuales han mostrado mejor desempeño.

Los grados API son variados de campo a campo por ejemplo, el aceite encontrado en Perdiz es de 30-35 °API, el Campo angostura tiene aceite crudo pesado de 20-25°API. Otro pozo que se esta Perforando es el Quetsalli-1 y se encuentra en el campo Perdiz pero es de un objetivo mas profundo, similar al de la arena del pozo Mocarroca-1, en el cual se encontró aceite de 30-35°API. Los otros campos como Cocuite, Playuela, Chalpa, Veinte, Novillero, Mirador, Vistoso, Lizamba, Apertura, Alquimia, Papan y Jaf producen gas no asociado al aceite. En la **Figura 1.4** se puede observar en que parte del terciario se localizan estos campos.



**Figura 1.4. Columna Geológica de la Cuenca Terciaria de Veracruz.**

---

## 1.2. VENTANA OPERACIONAL DE LOS GRADIENTES DE PORO Y FRACTURA PREDOMINANTES EN LA CUENCA

El Activo Integral Veracruz tiene pozos de dos periodos geológicos, el Cretácico y el Terciario, en el primero tiene campos como Matapionche, Copite, Mecayucan los cuales se encuentran al noreste de la Cuenca de Veracruz y son sedimentos progresivamente mas antiguos y se encuentran sobre un flanco de la estructura. Estos campos del cretácico tienen gradientes de presión de poro alrededor de 0.8 gr/cc y presión de fractura de 1.1 gr/cc, en los cuales es difícil perforar debido a la estrecha ventana operacional que se tiene, así también la toma de registros geofísicos es difícil, ya que algunas veces se quedan atrapadas las sondas de registros debido a la presión diferencial, por ello la complejidad de los pozos direccionales en este tipo de formación. En formaciones cretácicas los modelos para calcular los gradientes de fractura y presión de poro no se utilizan porque estos estan fundamentados en la teoría de acumulación de presión de poro en cuerpos masivos de lutita, que solo ocurren en formaciones del terciario, por este motivo, este trabajo se enfocará solo en formaciones terciarias.

Por otro lado, se tienen campos en el Terciario o Cuenca Terciaria de Veracruz como Cocuite, Playuela, Vistoso, Lizamba, Apertura, Arquimia, Jaf y Papan cuyas formaciones son mas consolidadas y la presión de poro y los gradientes de fractura se encuentran alrededor de 1.40 gr/cc y 2.10 gr/cc respectivamente, ya que resulta ideal esta ventana operacional para pozos direccionales y es posible perforar pozos de alcance extendido, formaciones con estas características de ventana operativa es donde se proponen este tipo de pozos y por ello solo se hablará de la Cuenca Terciaria de Veracruz.

Como ejemplo de una amplia ventana operacional de gradientes se tiene la **Figura 1.5** donde se muestra la presión de poro y gradientes de fractura con unidades de gramos sobre centímetro cúbico, del Pozo Exploratorio Ceres-1, el cual fue perforado de forma vertical. La línea roja de la figura es la presión de poro, la línea verde muestra la línea de densidad real que se utilizó al perforarlo y la línea azul el gradiente de fractura. La figura muestra la ventana operacional ideal para pozos de alcance extendido. Con este tipo de estudio de geopresiones también se detecta la profundidad de los acuíferos y se previenen posibles contaminaciones de estos, para posteriormente bajar una tubería de revestimiento y cementarla aislando el mismo. La perforación en el acuífero se realiza con lodo base agua, bentonítico biodegradable y no causa ningún daño. En esta misma figura se aprecia que el acuífero desaparece a aproximadamente 520 m.

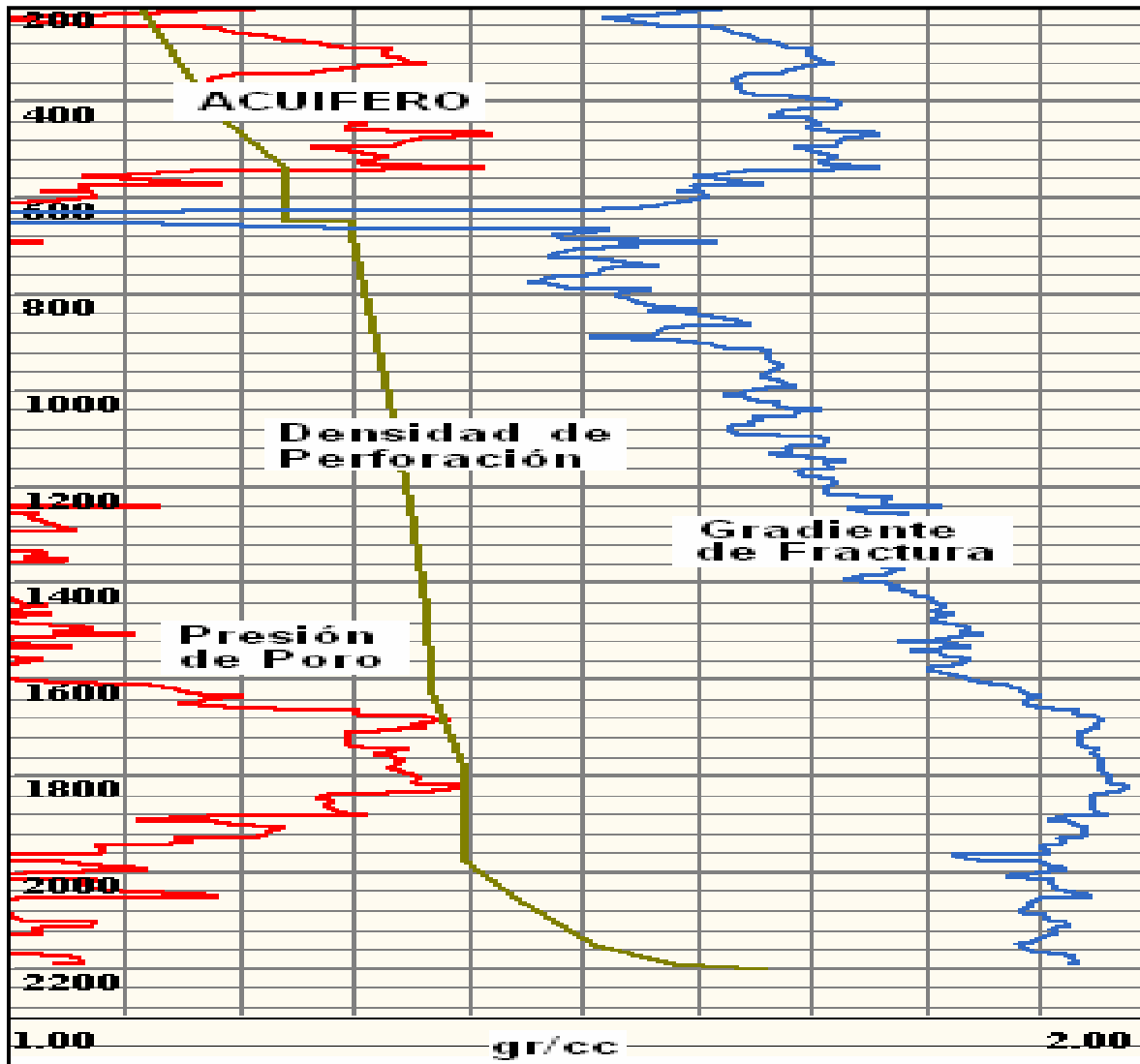


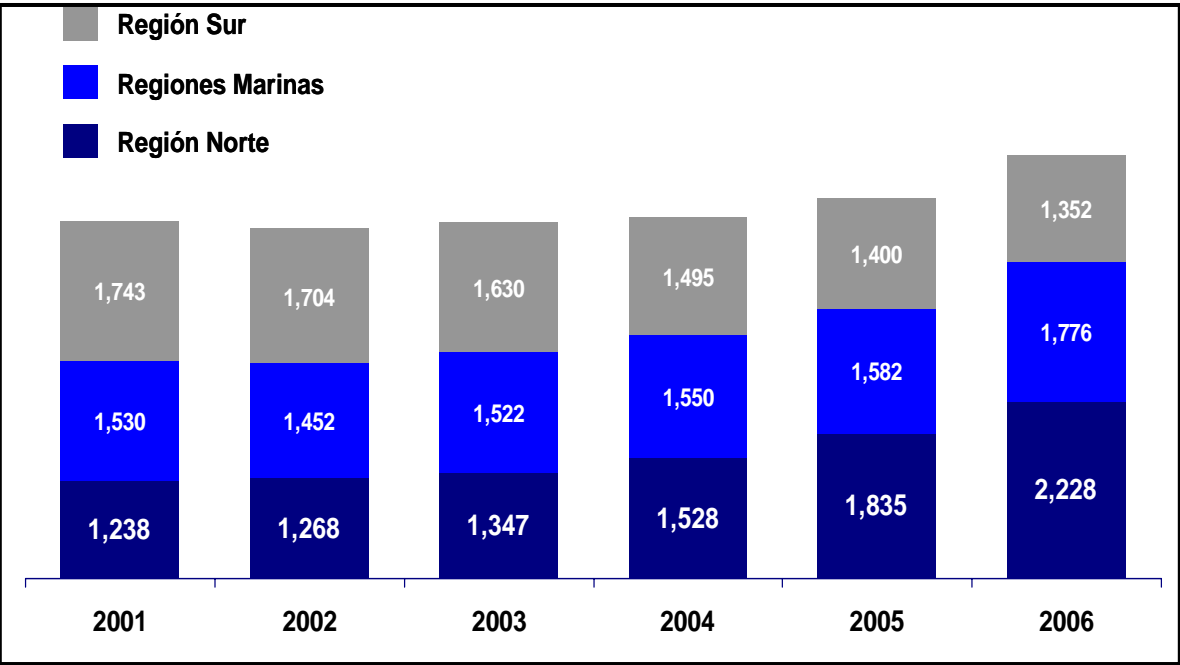
Figura 1.5. Gradientes de poro y fractura del pozo Ceres 1 a 2,200 metros verticales.

### 1.3. ESTADÍSTICAS DE LA PRODUCCIÓN DE GAS

La Cuenca Terciaria de Veracruz es productora de gas seco, esta es parte del Activo Integral Veracruz y a su vez de la Región Norte de Pemex Exploración y Producción. La perforación de los pozos petroleros de aceite y gas se lleva a cabo por la Unidad Operativa de Perforación Veracruz, la cual es una de las tres Unidades Operativas (Unidad Operativa de Perforación Burgos, Unidad Operativa de Perforación Poza Riza-Altamira y Unidad Operativa de Perforación Veracruz) de la Gerencia de Perforación y Mantenimiento de Pozos, División Norte. La producción de gas total del Activo es de 1,000 Millones de Pies Cúbicos Diarios (MMPCD) siendo 36.7% de la Región Norte y el 18.7% de la producción nacional. En los últimos diez años el Activo Integral Veracruz ha incrementado su producción, por lo que se considera un activo de los más rentables.

A manera de historia, la producción de gas seco en la Cuenca Terciaria de Veracruz comenzó en 1958 habiendo alcanzado un máximo de 40 MMPCD en 1969 y en 1971 de 45 MMPCD. La producción de gas húmedo comenzó en 1975 y alcanzó su máximo en 1997 con 135 MMPCD<sup>[2]</sup>.

Por otro lado, con base en las cifras publicadas en los “**Indicadores Petroleros**”, durante el 2006, la Región Norte se consolidó como la principal área productora de gas natural del país, dado que al aportar 2,228 millones de pies cúbicos al día (MMPCD) en promedio. Por ejemplo, tan solo en el mes de diciembre del mismo año, la paraestatal obtuvo en sus campos productores la cifra record de 2,404 millones de pies cúbicos diarios (MMPCD). De esta manera la región contribuyó con el 42% de la producción total de gas natural, seguida de las regiones marinas de la sonda de Campeche, con 1,776 millones de pies cúbicos diarios, que representaron el 33%. La región Sur aportó un volumen promedio de 1,352 millones de pies cúbicos por día, equivalentes al 25% de la producción total<sup>[3]</sup>. En la **Figura 1.6** se representa una gráfica de barras de la producción anual de las cuatro regiones, donde se visualiza la importancia de la producción de cada Región y la importancia de seguir perforando pozos de gas para beneficio de todos los mexicanos ya que cada vez la demanda de gas natural va en aumento.



**Figura 1.6. Producción de gas natural por Región, en millones de pies cúbicos diarios (MMPCD).**

## 1.4. ESTADÍSTICAS DE POZOS PERFORADOS

Debido a las necesidades para reducir el impacto ambiental, se han desarrollado pozos direccionales. En la actualidad, en el Activo Integral Veracruz, se perforan en mayor proporción este tipo de pozos con tendencia a los de tipo horizontal. A futuro, se prevé perforar pozos de alcance extendido para minimizar la afectación al medio ambiente, aumentar la productividad y reducir el costo de infraestructuras. En las localizaciones se perforan cinco o seis pozos para explotar el mismo o diferente yacimiento, perforando únicamente un pozo vertical y los otros direccionales. Esto reduce el número de localizaciones y los costos de los caminos y por consiguiente la tala de árboles se minimiza. En la **Figura 1.7**, se observa como se ha ido incrementando la perforación de pozos direccionales de 2000 a 2005 en el Activo Integral Veracruz, resultando en un aumento considerable.

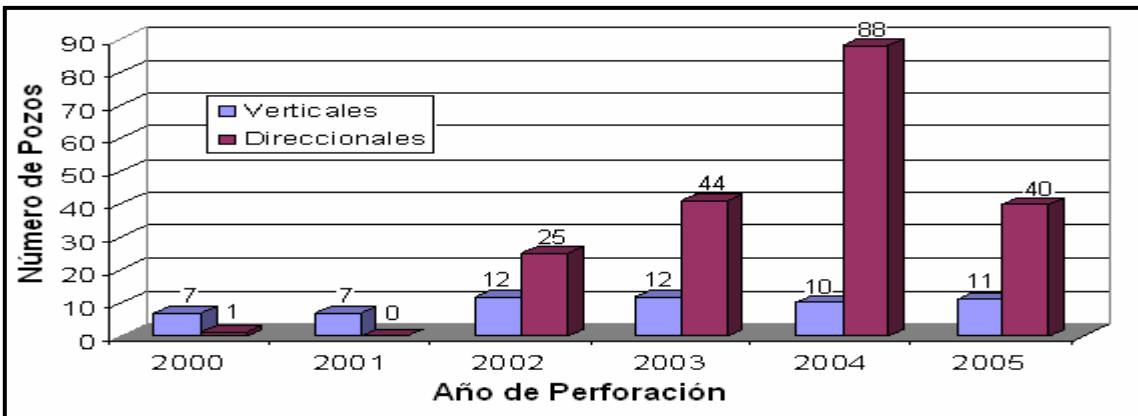


Figura 1.7. Tipos de trayectorias de pozos en el Activo Integral Veracruz.

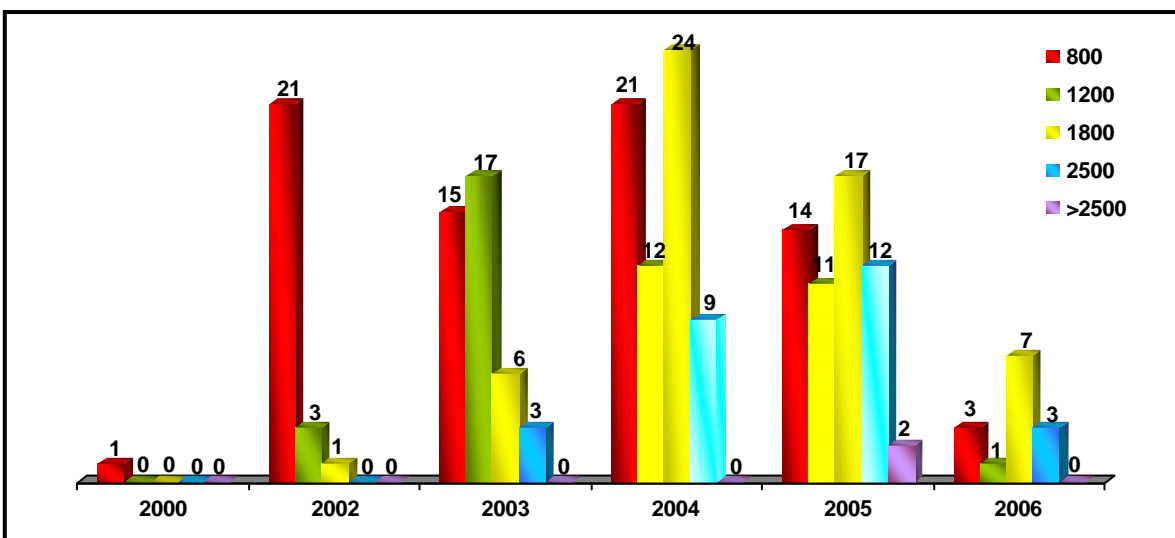
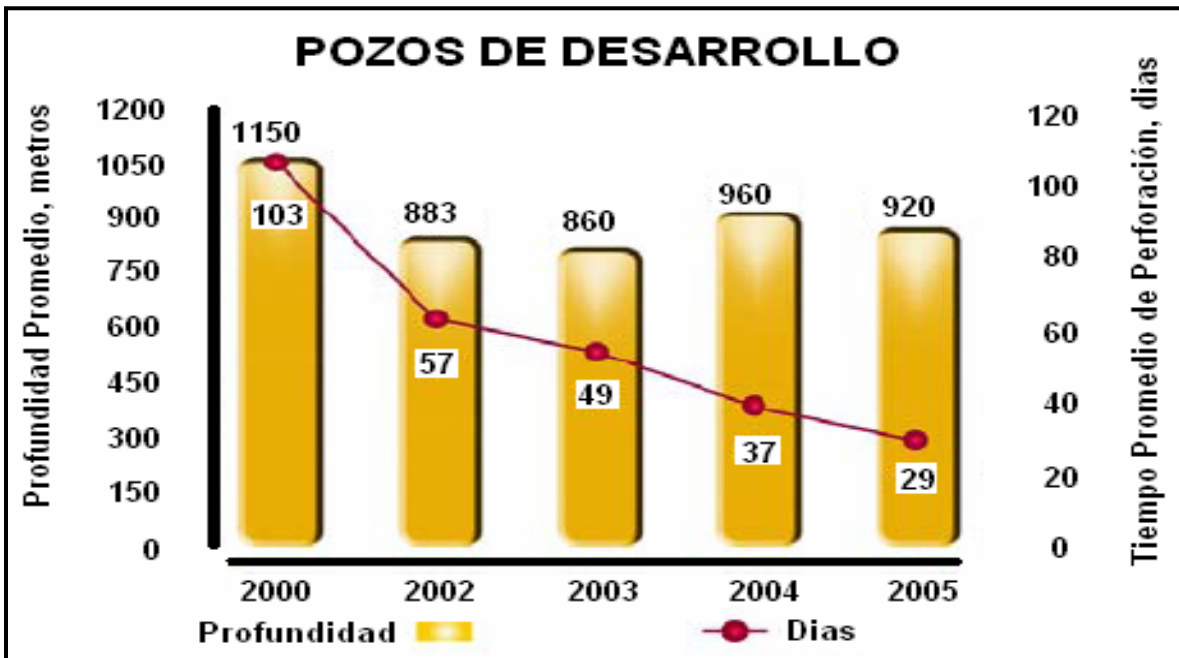


Figura 1.8. Desplazamiento de los pozos en el Activo Integral Veracruz.



El desarrollo del desplazamiento horizontal de los pozos también ha ido en aumento año con año a partir del 2002 en la Unidad Operativa de Perforación Veracruz, el cual se observa en la **Figura 1.8**. En dicha figura se observa que en el año 2005 se perforaron los primeros dos pozos con un desplazamiento mayor a los 2500 m.

Antes del 2000 se tenía un incremento en los tiempos de perforación pero debido a las nuevas tecnologías y experiencia del personal, estos tiempos han sido disminuidos, cuidando la seguridad del personal y los aspectos ambientales. Anteriormente se perforaban pozos en el Activo Integral Veracruz en 103 días, actualmente, se perforan en 29 días, como se muestra en la **Figura 1.9**<sup>[4]</sup>.



**Figura 1.9.- Reducción de Tiempos de Perforación en el Activo Integral Veracruz.**

Para diferenciar la gráfica de la **Figura 1.9**, se distinguirán los tiempos y profundidades verticales promedio de pozos exploratorios y de desarrollo para analizar por separado este tipo de pozos y observar como fue el desarrollo, los tiempos incluyen la terminación de los pozos, por ello se ve elevado el número de días en los que perforaron. En las **Figuras 1.10.a** y **1.10.b** de cada gráfica en la parte izquierda se tienen las profundidades verticales promedio y en la parte derecha se tiene el número de días en los cuales se perforaron y terminaron dichos pozos<sup>[4]</sup>.

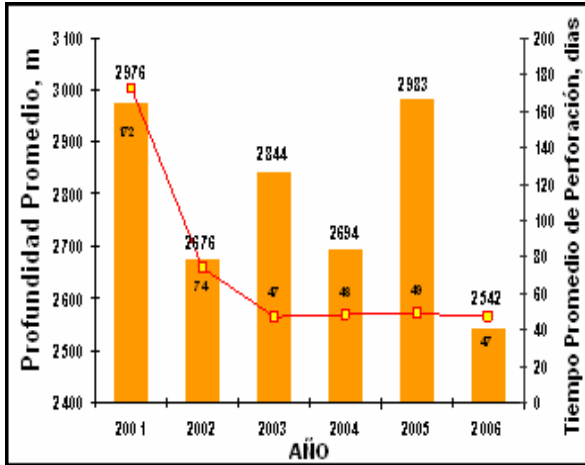


Figura 1.10.a. Pozos Exploratorios.

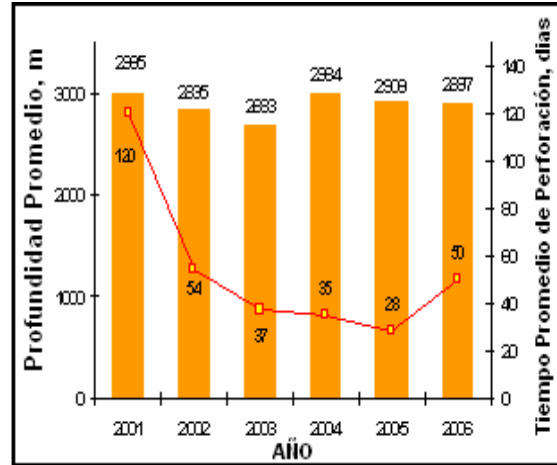


Figura 1.10.b. Pozos de Desarrollo.

## 1.5. PROBLEMAS ENCONTRADOS

Uno de los problemas que tiene nuestro país, es la necesidad de una mayor producción de gas natural para cubrir la demanda de la población, dado que recurre a la importación de gas y esto hace que el costo sea mayor. La importación se podría disminuir explorando y explotando todas las reservas de gas que tiene el territorio nacional, como la Cuenca Terciaria de Veracruz, la cual tendría que ser explorada en su totalidad, ya que existen cubos sísmicos que solo están en dos dimensiones tal es el caso de la localización programada Múchite-1. La **Figura 1.11** muestra una línea sísmica en dos dimensiones de la localización Múchite 1, la cual no ha podido ser perforada debido a que existe mayor incertidumbre que con la sísmica en tres dimensiones (3-D).

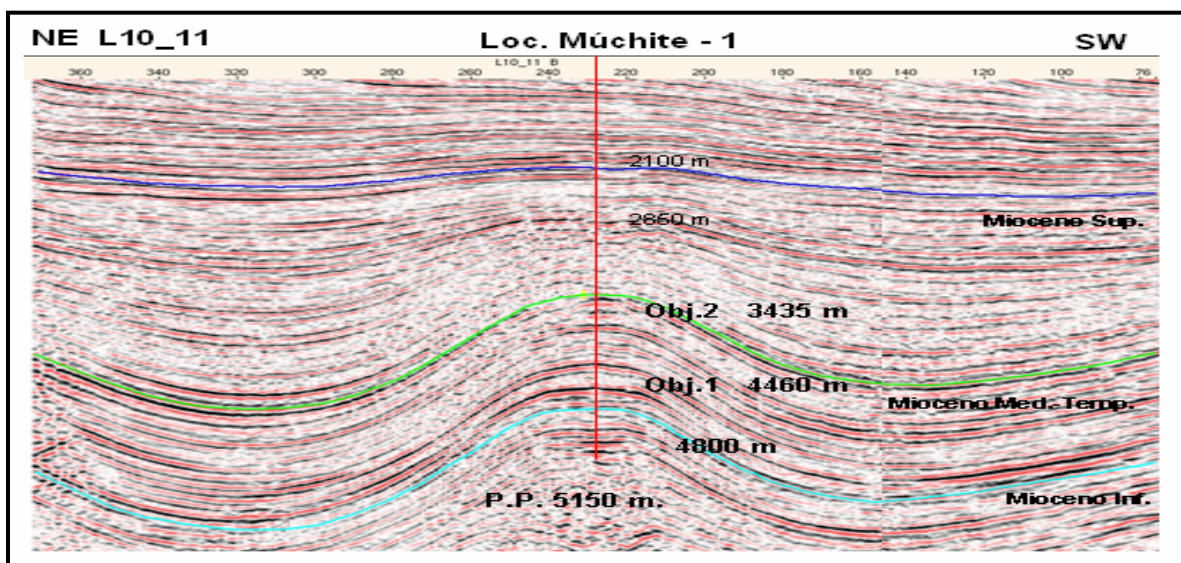


Figura 1.11. Sísmica en dos dimensiones Localización Múchite-1.

Existen problemas para perforar pozos en zonas de gran potencial que actualmente no están siendo explotadas en el Estado de Veracruz debido a la existencia de zonas protegidas por la flora y fauna donde no es posible perforar pozos, así también existen zonas pantanosas, manglares y lagunas, además de la geografía de los terrenos. Por otro lado la difícil obtención de permisos para las localizaciones. Los organismos mas fuertes que cuidan el entorno ecológico en el estado de Veracruz son: SEMARNAP, La Universidad Veracruzana y Green Peace. Se muestra especial interés debido a que es una zona turística. Por supuesto, PEMEX en su afán por mantener el entorno ecológico idea formas para llegar a esos yacimientos con cero impacto al ambiente. La **Figura 1.12** muestra la Localización Múchite-1, esta se encuentra bajo la Laguna Las Pintas, rodeada de un extenso sistema de lagunas y ríos.

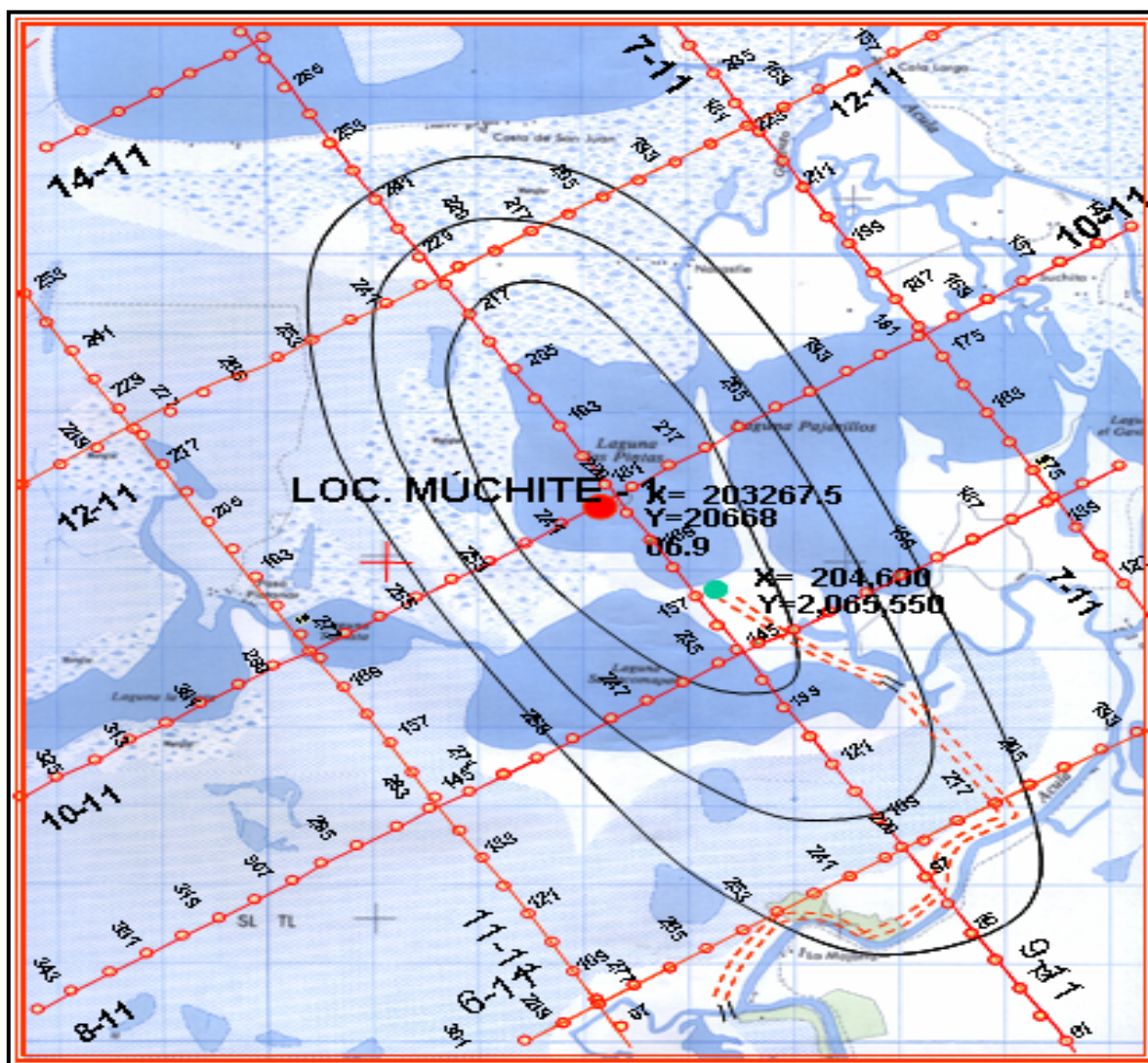
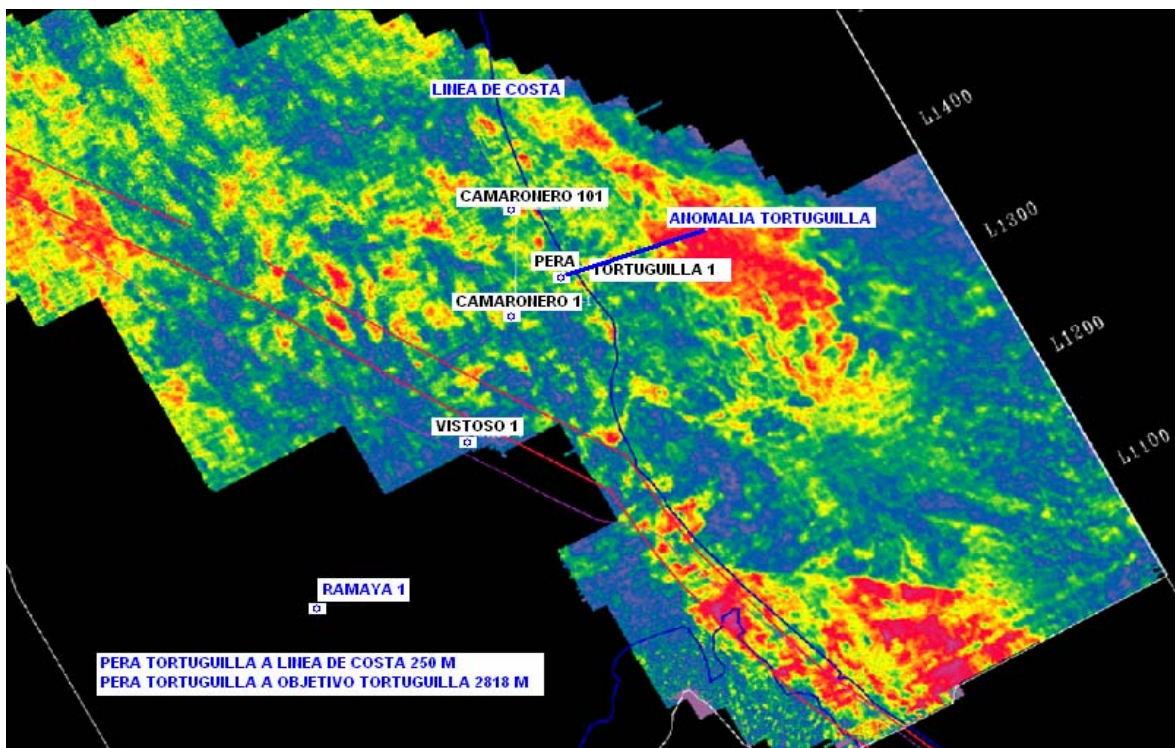


Figura 1.12. Lagunas cercanas a la Localización Múchite-1.



Otro problema al que se enfrenta el Activo Integral Veracruz es la ubicación ya que algunas zonas productoras se localizan mar adentro, cercanas a la línea de costa. Tal fue el caso del Pozo Tortuguilla-1, el cual se perforó desde una localización a 250 metros de la línea de costa y perforando direccionalmente hacia el mar, con un desplazamiento de 2793 m, siendo este pozo el de mayor desplazamiento en esta área, alcanzando 71° de inclinación con respecto a la vertical. Desafortunadamente, este pozo resultó seco, sin producción comercial de hidrocarburos, pero ofreció información para ajustar el cubo sísmico. La **Figura 1.13** muestra la anomalía Tortuguilla, la línea de costa y algunas localizaciones de pozos como: Camaronero-1, Camaronero-101 y Vistoso 1. En esta figura, se observa la existencia al sur de la anomalía tortuguilla, otra anomalía de posible interés encontrada en los límites del cubo sísmico.



**Figura 1.13. Anomalía Tortuguilla mostrando la línea de costa.**

Los problemas técnicos más relevantes que se tienen en la perforación de pozos petroleros en la Cuenca Terciaria de Veracruz son debido a:

- Limpieza de agujero
- Ventana operacional estrecha de los gradientes de fractura y presión de poro a grandes profundidades, después de los 3500 m.
- Pegaduras de tuberías por presión diferencial.

---

## 1.6. NECESIDADES

En la actualidad ya no se tienen pozos “fáciles”, donde se perforaba verticalmente o con poco desplazamiento horizontal, si no que las condiciones se tornan más inhóspitas teniendo que perforar pozos más profundos y con mayor desplazamiento horizontal.

Por otro lado, cada vez se cuida más el entorno ecológico, por ello la perforación de pozos está evolucionando y se tiene que recurrir a técnicas de perforación que garanticen la rentabilidad del proyecto, pero que además sean técnicamente factibles. Tal es el caso de la perforación de alcance extendido, donde por necesidad se pueden alcanzar objetivos que están más allá de los cinco kilómetros o con una relación 2 a 1 el desplazamiento horizontal con la profundidad vertical.

Si no evolucionan los diseños de pozos convencionales, en algún tiempo ya no se encontrarán yacimientos productivos debido a que no será posible acceder a ellos por las múltiples complicaciones del área, pero sobre todo por que no se estará lo suficientemente preparados para entender estos problemas.

---

## 2. POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO

En este capítulo se describirán los pozos de alcance extendido, y la clasificación que hacen las operadoras de perforación de cada uno de ellos, así como la evolución a nivel mundial de los alcances y como ha ido evolucionando la Unidad Operativa de Perforación Veracruz en cuanto a los alcances de los pozos. También se hablará de las limitaciones de los pozos de alcance extendido, las características de los equipos de perforación de este tipo de pozos y los beneficios que estos pueden tener en comparación con pozos convencionales. Para ello se recurrirá a las estadísticas e información que aparece publicada en la literatura de ingeniería petrolera a nivel mundial.

### 2.1. DESCRIPCIÓN

Hablar de pozos de alcance extendido es hablar de una técnica que no se ha utilizado en nuestro país, pero que podría ser muy útil para alcanzar yacimientos que en la actualidad por sus condiciones no se han podido perforar, como es el caso de la localización Muchite-1 (mencionado en el **Capítulo 1**) localizado en la Cuenca Terciaria de Veracruz, ya que hasta el momento solo se han perforado pozos verticales, direccionales, horizontales y multilaterales (pozo Papan 93).

Como se ilustra en la Figura 2.1, un pozo de alcance extendido es una curva del pozo resultante de la relación del desplazamiento horizontal dos veces mayor a la profundidad vertical. Esta relación puede ser mayor a dos y en algunos casos hasta cinco como es el caso de los pozos perforados en el Mar del Norte. En el caso de ser esta relación mayor a tres se le llama mega alcance extendido<sup>[1]</sup> y si es mayor a cinco se le llama pozo de ultra alcance extendido<sup>[2]</sup>.

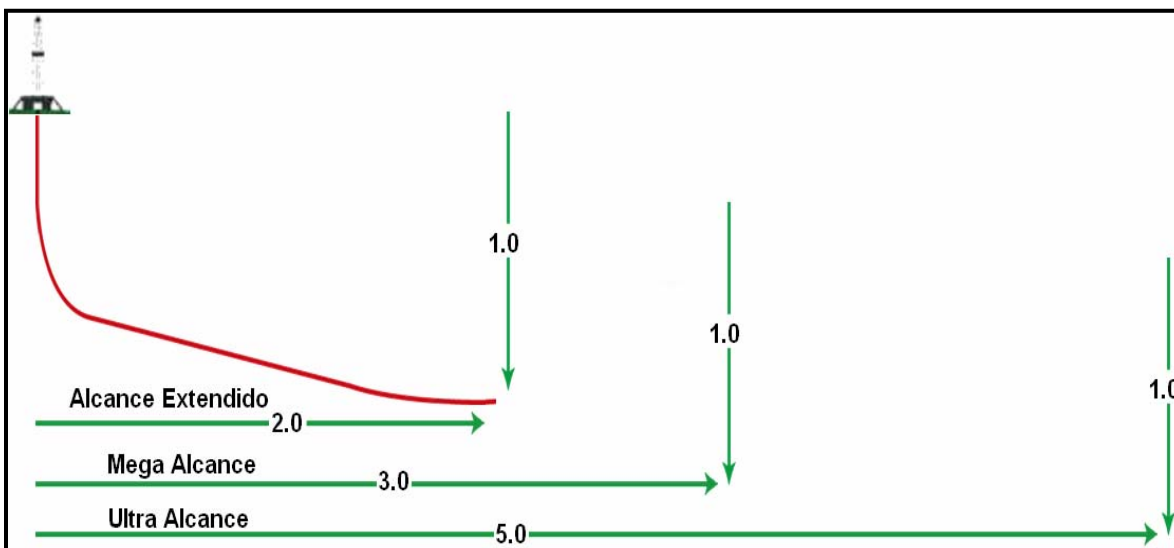


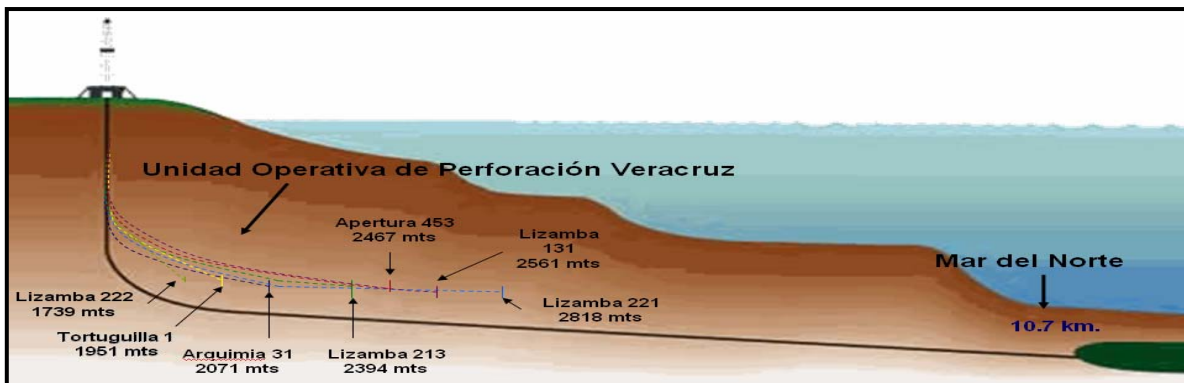
Figura 2.1. Esquema representativo de un pozo de alcance extendido.

El propósito del alcance extendido es llegar y explotar yacimientos alejados ya sea en operaciones en tierra o costa fuera, donde por razones técnicas, económicas o ambientales no es posible perforar un pozo vertical o direccional. Con la perforación de pozos de alcance extendido se requieren menos pozos para drenar un yacimiento debido a la productividad que nos proporciona una mayor sección expuesta de yacimiento. En este tipo de perforación se tienen que tomar en cuenta diversos parámetros para que sea exitosa, estos pueden ser:

- Estabilidad Mecánica del agujero
- Limpieza de los recortes de perforación
- Hidráulica de perforación
- Presión de Poro y Gradientes de Fractura.

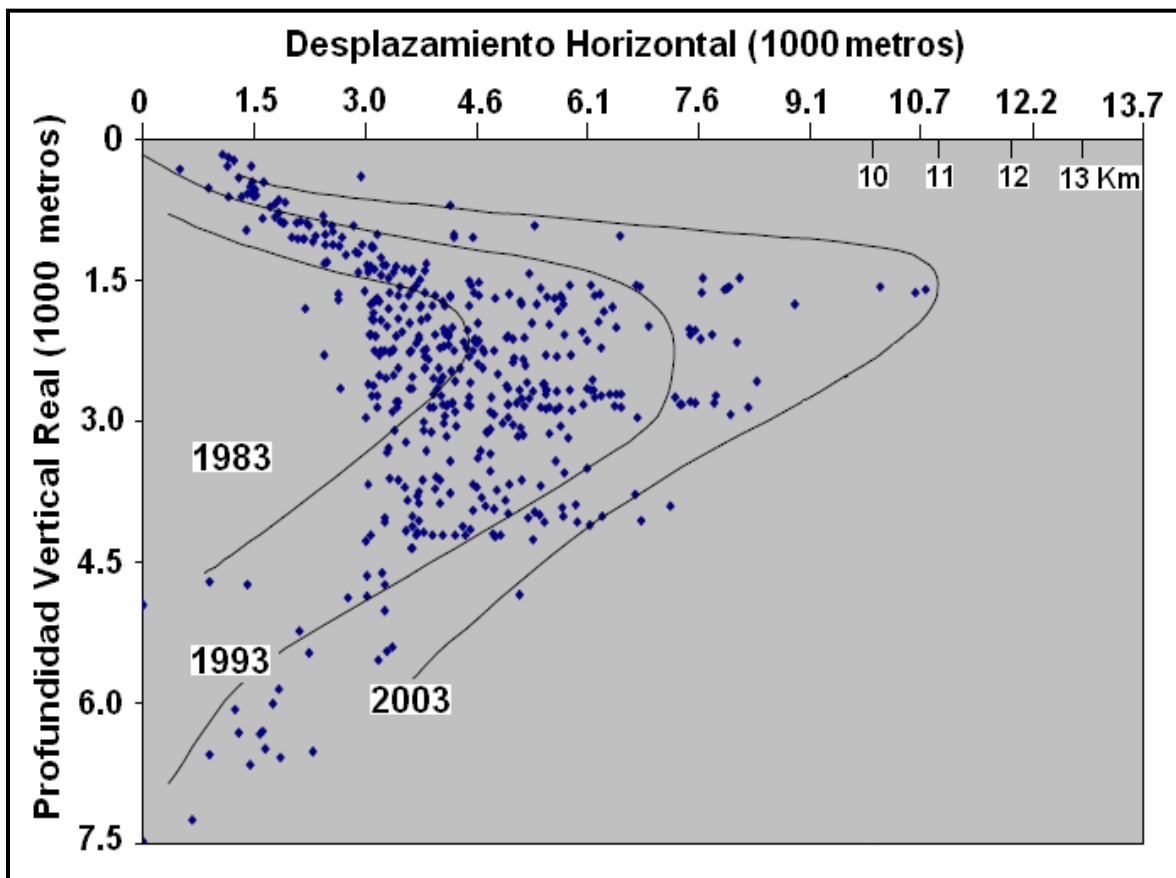
En el caso de pozos en la Cuenca Terciaria de Veracruz, los objetivos de algunos yacimientos se encuentran a profundidades verticales de 2700 m aproximadamente y con el uso del alcance extendido a esa profundidad de objetivo se podrían perforar pozos con un desplazamiento horizontal de 5400 m, si se planean de manera conservadora, pero si se alcanza la relación 3:1 se alcanzarían desplazamiento de hasta 8100 m, desde luego haciendo un estudio previo de las formaciones que serían cortadas por la barrena. En este caso esos 5.4 km. podrían ser dirigidos hacia la línea de costa sin tener que utilizar una plataforma y sin afectar el entorno turístico y ecológico como es el caso del Puerto de Veracruz. Así también se podrían perforar pozos donde sus objetivos se encuentran en la parte inferior de alguna laguna como es el caso del Campo Lizamba, donde sus zonas productoras se encuentran en la parte inferior de la Laguna de María Lizamba en el Activo Integral Veracruz.

Hasta el momento de la investigación el pozo con mayor alcance en el mundo se perforó en el Mar del Norte, en el Campo Wytch Farm y el Pozo es el M-16Z, cuyo desplazamiento fue de 10.7 Km. logrando terminarlo con éxito. Al hacer un comparativo de los pozos que ha perforado la Unidad Operativa de Perforación Veracruz se está muy por debajo de los alcances a nivel mundial, como se muestra en la **Figura 2.2.**



**Figura 2.2. Representación esquemática de los alcances de pozos en Veracruz.**

El incremento en el uso de la perforación de pozos de alcance extendido para alcanzar yacimientos que no eran económicamente recuperables usando una técnica convencional se desarrolló durante la década de los 80's. Una vista general de cómo se ha desarrollado la perforación de los pozos con respecto a su alcance a nivel mundial se puede observar en la **Figura 2.3**, donde la actividad mas agresiva se llevó a cabo en los 90's.



**Figura 2.3. Evolución de la Perforación de Alcance Extendido a nivel mundial.**

Por otro lado la Unidad Operativa de Perforación Veracruz (UOPV) también ha tenido desarrollo, aunque no ha llegado al alcance extendido de 2:1 ha podido perforar pozos direccionales, horizontales y multilaterales, alcanzando un desplazamiento de relación 1.56:1, el desplazamiento horizontal con respecto a la profundidad vertical, como es el caso del pozo Lizamba 221. Dicho desarrollo se muestra en la **Figura 2.4** mostrando pozos del Campo Lizamba, el pozo Tortuguilla y pozos de la Región Sur y Marina, sobreponiendo los pozos internacionales M-05, M-11 y Xijiang 24-3 que son los de mayor alcance a nivel mundial, los dos primeros se encuentran ubicados en el Mar del Norte y el Tercero en el Mar del Sur de China. Esto con el fin de ubicar en donde está nuestro país actualmente y trabajar para alcanzar la perforación de alcance extendido y adaptar estas experiencias en pro de la Industria Petrolera Mexicana.



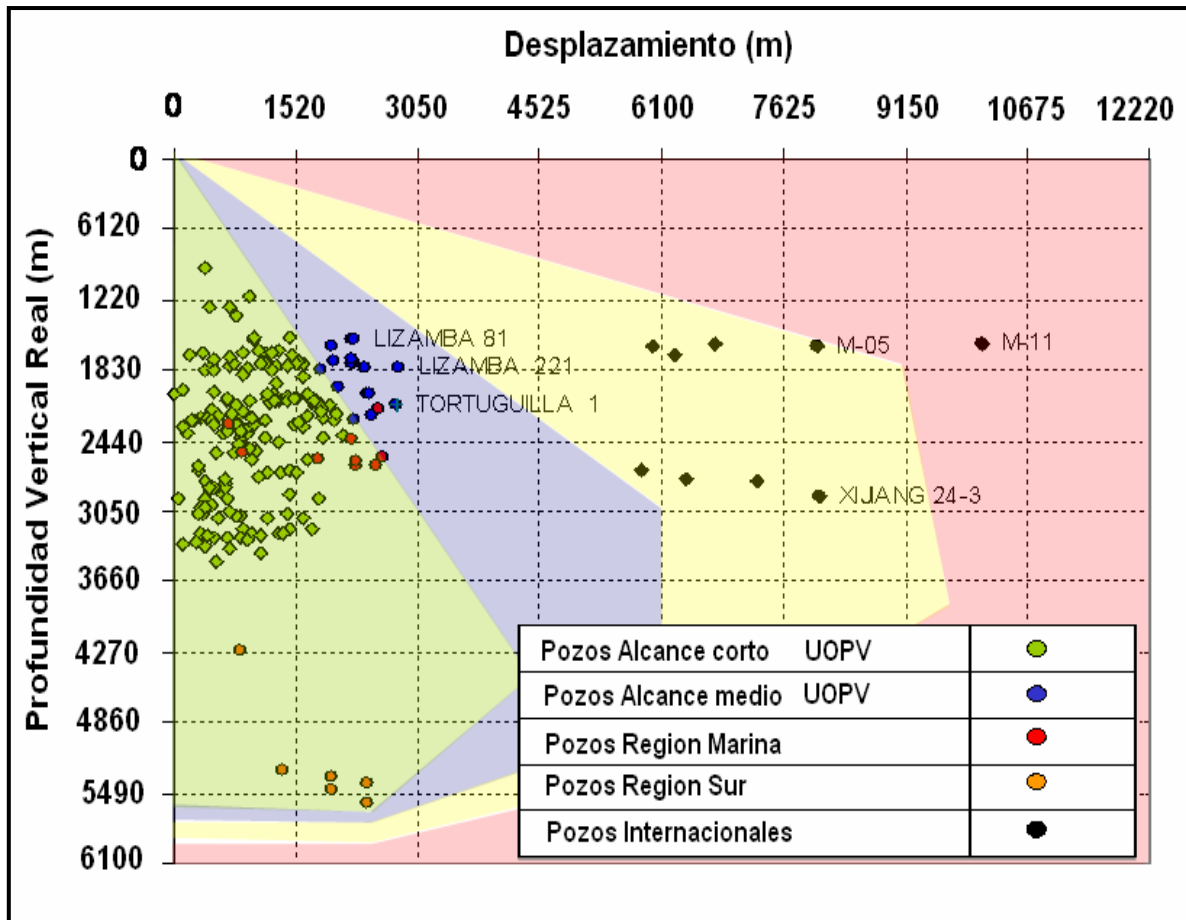


Figura 2.4. Evolución de la Perforación direccional a nivel local en la UOPV comparada con Pozos Internacionales.

Las operadoras petroleras a nivel mundial han moderado y limitado los pozos de alcance extendido y los han situado en tres niveles como son: bajo, intermedio y profundo, como se muestran en la **Tabla 2.1**, de acuerdo a su profundidad vertical y a su desplazamiento horizontal. Esta clasificación la proporcionan las operadoras<sup>[3]</sup> de acuerdo a los pozos que han perforado, en el caso del Pozo M-16z entra en el nivel 1 o bajo, ya que las arenas que producen se encuentran a una profundidad somera de alrededor de los 1,500 m.

Tabla 2.1. Niveles de pozos de alcance extendido.

| Nivel          | Profundidad Vertical Real (m) | Desplazamiento Horizontal (m) | Relacion Desplazamiento/PVR |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 1 ó bajo       | 1,524                         | 10,000                        | 6.56                        |
| 2 ó intermedio | 3,048                         | 8,000                         | 2.62                        |
| 3 ó profundo   | 4,573                         | 7,000                         | 1.53                        |

Se observa que en el nivel 3 (o profundo) no se cumple la relación 2 a 1, pero por la complejidad de un pozo de este tipo se le da la característica de alcance extendido, enfatizando que este es el único caso donde no se cumple dicha relación y fue acordado por consenso de varias operadoras internacionales de perforación para poner límites al alcance extendido. Debajo de 4,573 m de profundidad vertical real solo se han perforado pozos direccionales y se asume que a esta profundidad se perforan pozos con trayectorias tipo “S”.

Año con año, se han realizado pozos con mayor alcance y la probabilidad de encontrar problemas es mas alta que en los pozos convencionales. En la **Figura 2.5**, se observa como se han perforando pozos con mayor alcance y donde la mayoría se han perforado en un rango de 3,048 m (10,000 pies) a 4,573 metros (15,000 pies) de desplazamiento horizontal, menos de 80 pozos se han perforado en un rango entre 4,573 m (15,000 pies) y 6,097 m (20,000 pies) de desplazamiento horizontal, menos de 20 pozos con desplazamiento de 6,097 m (20,000 pies) a 7,622 m (25,000 pies), mas allá de desplazamientos de 7,622 m (25,000 pies) solo 6 pozos, y solamente 1 pozo ha tenido un alcance horizontal mayor a 9,146 m (30,000 pies)<sup>[3]</sup>. Con esta gráfica se observan pozos con alcance extendido pero cada vez son menos los que logran cumplir esas metas, así también los problemas se ven incrementados ya que un mínimo detalle repercutiría en el éxito o fracaso del proyecto. Por otro lado esos pozos con mayor alcance son pozos clave, los cuales tuvieron una gran inversión y evitaron la construcción de una plataforma ahorrando dinero.

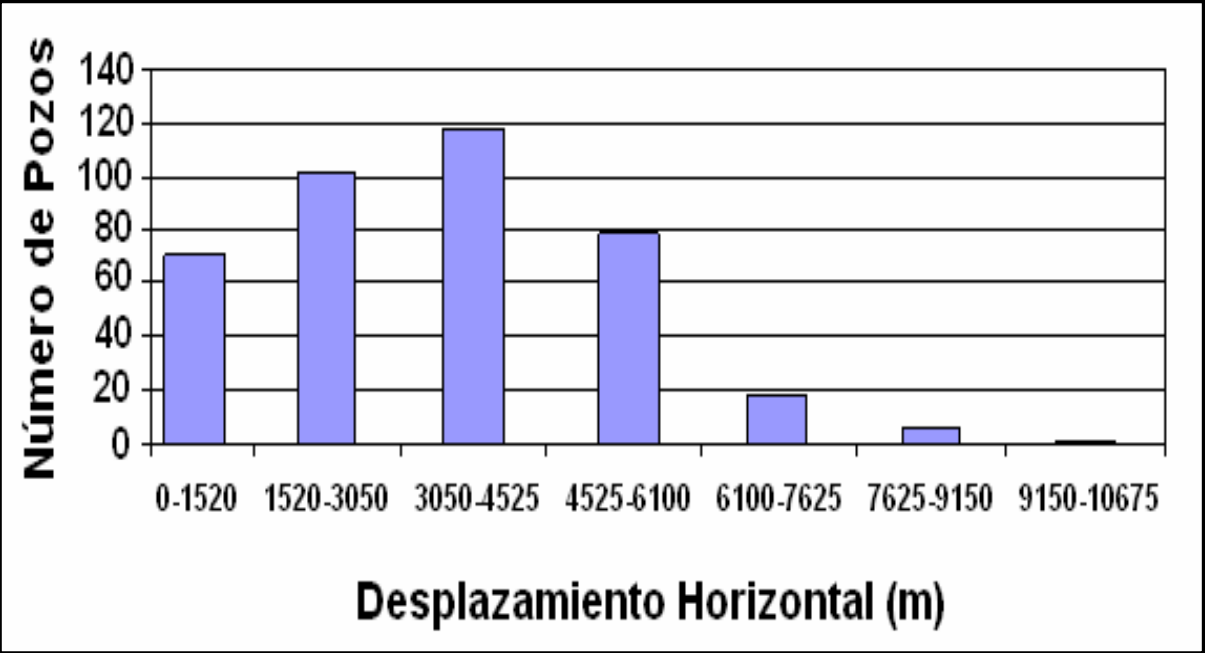


Figura 2.5. Distribución de pozos de alcance extendido a nivel mundial.

---

## 2.2. LIMITACIONES

Las operadoras de perforación a nivel mundial ponen límites a sus proyectos, esto con el fin de que sean exitosos, en la literatura se encontró que los límites de los pozos de alcance extendido pueden dividirse en dos grupos:

- Mecánicos
- Relacionados a la formación

Los límites mecánicos se refieren a los relacionados con las operaciones de perforación, como uso de top drive, máximo de torque y arrastre, material de la sarta de perforación, gasto proporcionado por la bomba, hidráulica de perforación, dimensiones y capacidad del equipo de perforación. El arreglo de pozos que comúnmente se utilizan en alcance extendido<sup>[3]</sup> se muestra en la **Tabla 2.2.**

**Tabla 2.2. Arreglo convencional de pozos de alcance extendido a nivel mundial.**

| Tipo de Tubería     | Diámetro de Tubería de Revestimiento (pg) | Diámetro de Barrena (pg) |
|---------------------|---|--------------------------|
| Conductor           | 24  |                          |
| Superficial         | 18 5/8                                    | 22                       |
| Intermedia          | 13 3/8                                    | 16 ó 17 ½                |
| Intermedia          | 9 5/8                                     | 12 ¼                     |
| Liner de Producción | 5 1/2 ó 7                                 | 8 ½                      |

Los límites relacionados con la formación dependen de las propiedades del yacimiento, formaciones que son cortadas, estabilidad del agujero, presión de poro y gradiente de fractura, problemas de derrumbes y de pérdida de circulación, en base a estos se calcula la densidad adecuada del fluido de perforación.

Para las trayectorias la limitación es dos dimensiones geométricas, es decir el pozo no debe de tener cambios de azimut porque se estaría comportando la curva direccional en tres dimensiones y es lo que se quiere evitar para que se tengan los mínimos problemas al construir la curva, con un diseño optimo de la sarta de perforación se evitarían problemas de torque y arrastre y se minimizarían los problemas al introducir la tubería de revestimiento. La profundidad de las tuberías de revestimiento puede variar en función de las formaciones que sean atravesadas y la que resulte más conveniente en cada caso para asentarla. Así también esta profundidad depende de la ventana operacional de la presión de poro y gradiente de fractura.

---

## 2.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DE PERFORACIÓN

En las características de Equipo de Perforación para pozos de alcance extendido, se definen dos capacidades que podrían ser consideradas, las cuales se mencionan en la **Tabla 2.3**<sup>[3]</sup>. Se observa que el torque que manejan es elevado y las presiones de bombeo en equipos grandes llegará hasta 7,500 lb/pg<sup>2</sup>. En los equipos con que cuenta la Unidad Operativa Veracruz la máxima presión de bombeo no excede 3, 500 lb/pg<sup>2</sup>.

**Tabla 2.3. Características de equipos para perforar pozos de alcance extendido.**

| Equipo para Perforar Pozos de Alcance Extendido | Torque Máximo en Superficie (pie-lb) | en Máxima presión de bombeo [lb/pg <sup>2</sup> ] |
|---|--------------------------------------|---|
| Standard  | 45,000                               | 5,000   |
| Grande  | 65,000                               | 7,500   |

Además se tienen que tomar en cuenta las especificaciones de la sarta de perforación, donde se tomará en cuenta el peso de toda la sarta para verificar si el equipo podrá levantar ésta sin ningún problema. Las sarts de perforación utilizadas en pozos de alcance extendido<sup>[3]</sup> se listan en la **Tabla 2.4**.

**Tabla 2.4. Sarts de perforación utilizadas en la perforación de pozos de alcance extendido.**

| Diámetro externo de la TP (pg) | Peso (lb/pie) | Grado | Torque Máximo en Superficie (pie-lb) | Cedencia a la Tensión (lbf) |
|--------------------------------|---------------|-------|--------------------------------------|-----------------------------|
| 6 5/8                          | 25.2          | S-135 | 44,200                               | 881,000                     |
| 5 1/2                          | 21.9          | S-135 | 46,560                               | 787,000                     |

Al perforar pozos de alcance extendido, es indispensable el uso de Top-Drive, debido a que cuando se introduce la tubería de perforación de forma convencional (tramo por tramo) el trabajo se realiza de forma lenta y cuando se realiza en lingadas (secciones de tres tramos unidos), los trabajos se realizan de forma mas rápida, disminuyendo con ello el tiempo de conexiones y evitando la formación de escalones en el fondo del pozo. Así también el Top Drive es exacto en el número de revoluciones por minuto que se le aplican a la sarta de perforación a diferencia de la mesa rotaria que solo es aproximada en las revoluciones por minuto que se le proporcionan a la sarta.

---

## **2.4. BENEFICIOS DE UTILIZAR ALCANCE EXTENDIDO EN LA CUENCA TERCIARIA DE VERACRUZ**

La importancia de pozos de alcance extendido es que hoy en día si queremos ser competitivos y no quedarnos en el atraso en el aspecto de perforación debemos incursionar en este tipo de proyectos ya que es una solución para abarcar áreas alejadas de los yacimientos. Aún queda por explorar y explotar una gran parte de la Cuenca Terciaria de Veracruz y resultaría benéfico analizar la posibilidad de aplicar este tipo de tecnología para aumentar la producción de gas que tiene el Activo Integral Veracruz y que día con día se va incrementando debido al esfuerzo de los petroleros.

En cuanto a aspectos ambientales, Petróleos Mexicanos al igual que el resto del mundo esta trabajando para disminuir el impacto ambiental, y si desde una sola plataforma marina o localización en tierra se pueden perforar mas pozos estaríamos contribuyendo a mantener el entorno ecológico. Este sería el inicio de un trabajo contribuyente para que en un futuro se aplique esta técnica de perforar pozos de alcance extendido y se mantenga nuestro planeta en condiciones habitables.

El éxito de la utilización de la perforación de alcance extendido en la Cuenca Terciaria de Veracruz brindaría la posibilidad de su aplicación en otras zonas del país donde existen las mismas necesidades y que tengan condiciones similares al periodo Terciario, por que la técnica es general así como las ecuaciones de estado y de balance de materia que se utilizaran para desarrollar el modelo hidráulico en el “Capítulo 6”.

## **2.5. ASPECTO ECONOMICO**

En el aspecto económico, resulta mas rentable la producción de un pozo horizontal que un vertical, en el caso de alcance extendido los pozos entran en las características de un pozo horizontal o de alto ángulo. Esto se puede justificar técnicamente por que tenemos mayor área de contacto del yacimiento con las paredes del pozo, lo cual hace drenar con mayor facilidad y con un mayor gasto de producción de gas o de aceite.

Sin detallar cifras , el costo de la perforación de un pozo con equipo terrestre de alcance extendido, resultaría menor que la perforación de un pozo convencional (vertical con equipo marino o barcaza), y dado a que al utilizar una barcaza o una plataforma autoelevable es mas costoso, ésta sería otra forma de perforar pozos en alguna laguna o zona pantanosa como las que existen en el estado de Veracruz, por lo que la logística que se tiene que utilizar y el trafico de embarcaciones ocasionaría grandes problemas al entorno ecológico.

---

La empresa Petróleos Mexicanos (PEMEX) trabaja día con día para disminuir el daño al ambiente y en un futuro espera que ya no se vea si un pozo es mas barato que otro, si no que contamine menos, claro que no es el caso de todas las zonas ni de todos los pozos, en el capítulo anterior y en este se ha mencionado cuales serían los casos críticos para tomarse en cuenta.

## **2.6. MECÁNICA DE ROCAS**

En la planeación de un pozo de alcance extendido, es importante tomar en cuenta la geomecánica de rocas, donde como primer paso se analizan los esfuerzos del pozo para definir las características mecánicas de la formación, definiendo las propiedades físicas, estructurales y mecánicas, teniendo que seleccionar la información de acuerdo a la siguiente lista<sup>[4]</sup>:

- Propiedades mecánicas vírgenes
- Propiedades post-elásticas en presencia de fluidos de perforación
- Magnitud y dirección de los esfuerzos in situ.

Es importante tomar en cuenta la mecánica de rocas, ya que con datos de presión de poro y gradientes de fractura, densidades del fluido propuesto y trayectoria direccional, se calcula la densidad mínima para que no se colapse el agujero y se llegue al objetivo de navegar en alcance extendido, por ello no se pueden pasar por alto los esfuerzos horizontales y verticales que tiene la roca y que forman parte de la estabilidad del agujero<sup>[5]</sup>.

Cuando se planea realizar un proyecto de alcance extendido, previamente, se tienen que realizar pruebas de esfuerzos triaxiales a núcleos del campo donde se requiere perforar, esto es a pozos anteriores, siendo el nuevo pozo ya de desarrollo, sería arriesgado no realizar este tipo de estudios ya que con ellos se ve la estabilidad de la formación, estos datos son muy importantes para garantizar el éxito del pozo.

---

### 3. EXPERIENCIA DE POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO EN OTROS PAÍSES

En este capítulo se mencionan los 20 pozos con mayor alcance a nivel mundial, de los cuales se seleccionaron dos describiendo las experiencias y los problemas que se tuvieron en las operaciones, uno de ellos es el pozo M-16Z del Campo Wytch Farm, ubicado en el Mar del Norte, en el área del Reino Unido, este es el de mayor alcance con una relación 6.5 la profundidad vertical con la desarrollada, el otro es el pozo Xijiang 24-3, en el Mar del Sur de China de la República Popular China, ubicado en la posición número 8 de la **Tabla 3.1** de los 20 pozos con mayor alcance. El primero fue perforado desde un equipo en tierra y el segundo desde una plataforma fija costa fuera. Estos pozos fueron perforados en formaciones terciarias, similares a las que tenemos en la Cuenca Terciaria de Veracruz.

En varias partes del mundo se han perforado pozos de alcance extendido, teniendo cada vez un mayor desplazamiento, algunos han sido en tierra y otros costa fuera, pero todos van encaminados a tener el mayor alcance posible. Los países vanguardistas en esta técnica son Reino Unido, Argentina, Australia, Alemania, China, Noruega y Dinamarca; en los cuales han trabajado las principales operadoras de perforación<sup>[1]</sup>. La **Tabla 3.1** muestra los pozos de mayor alcance que se han perforado a la fecha de la investigación, cada día las compañías operadoras desean tener un nuevo record en este ámbito y siguen trabajando en ello. Con lo anterior se espera que PEMEX tome en cuenta la posibilidad de incursionar en este tipo de pozos y planee a futuro pozos que sean más rentables y con un menor impacto ecológico.

#### 3.1. MAR DEL NORTE CAMPO WYTCH FARM

El campo Wytch Farm se encuentra en el Mar del Norte, donde se han perforado mas pozos de alcance extendido, así este campo va a la vanguardia en cuanto a este tipo de pozos, imponiendo record cada vez que se perfora un nuevo pozo, por ello se mostrará este campo y como ha evolucionado. En la **Tabla 3.2** se muestran los pozos del campo Wytch Farm en los que se utilizó esta técnica, donde se observa el pozo M-16Z con un desplazamiento de 10,730 m y con la mayor relación a nivel mundial de alcance de 6.5 la profundidad vertical entre el desplazamiento horizontal.

##### 3.1.1. DESCRIPCIÓN DEL CAMPO WYTCH FARM

Wytch Farm es el campo de producción de aceite del oeste de Europa más grande en tierra, el cual comprende 3 yacimientos principales, el somero Frome Limestone a 800 mV, el yacimiento Bridport a 900 mV y el yacimiento mas grande y mas productivo es el Sherwoor a 1600 metros verticales. El Bridport ha producido desde el año 1979, siendo la primera etapa del desarrollo de Wytch

Farm. La segunda etapa consistió en las reservas en tierra Sherwood y la tercera etapa es la marina de Sherwood<sup>[1]</sup>.

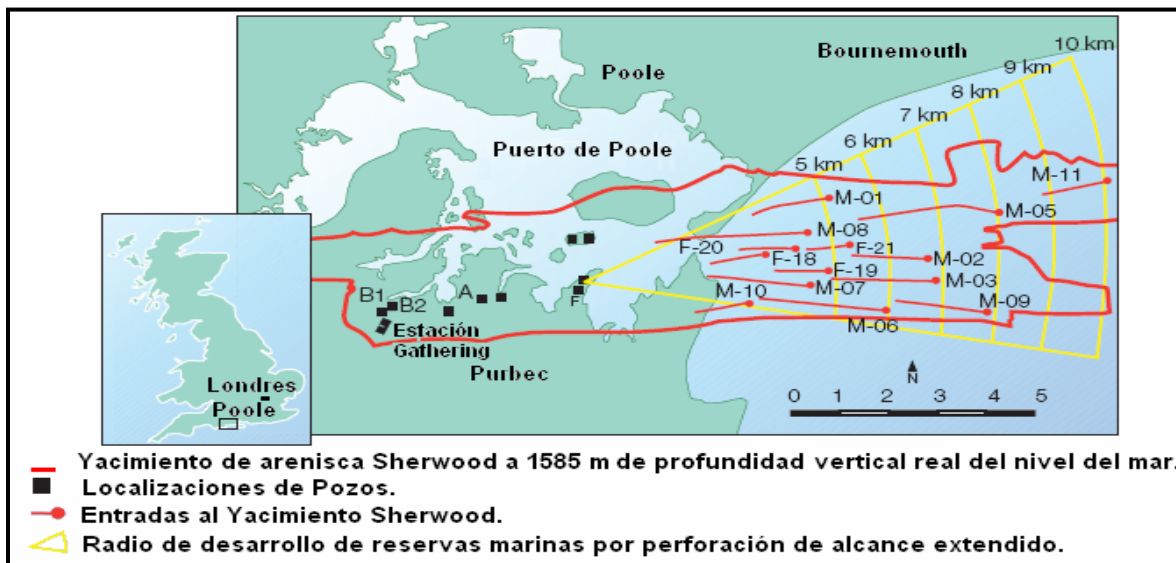
**Tabla 3.1. Los 20 pozos con mayor alcance extendido a nivel mundial.**

| #  | Desp. Horiz. m | Prof. Medida m | PVR m | Relación Alcance | Operadora   | Pozo                   | Campo       | Área                 |
|----|----------------|----------------|-------|------------------|-------------|------------------------|-------------|----------------------|
| 1  | 10730          | 11278          | 1637  | 6.5              | BP          | M-16Z                  | Wytch Farm  | RU en tierra         |
| 2  | 10585          | 11184          | 1657  | 6.4              | Total       | CN-1                   | Ara         | Argentina            |
| 3  | 10114          | 10658          | 1605  | 6.3              | BP          | M-11                   | Wytch Farm  | RU en tierra         |
| 4  | 8938           | 9557           | 1795  | 5.0              | BP          | M-14                   | Wytch Farm  | RU en tierra         |
| 5  | 8306           | 9278           | 2896  | 2.9              | Woodside    | GWA-18                 | Goodwyn     | Australia            |
| 6  | 8181           | 8687           | 1498  | 5.46             | Total       | CS-1                   | Kaus        | Argentina            |
| 7  | 8146           | 8995           | 2191  | 3.7              | RWE-DEA     | Dieksand 5             | Mittelplate | Alemania             |
| 8  | 8062           | 9236           | 2985  | 2.7              | Phillips    | 24-3 A-14              | Xijiang     | Mar del Sur de China |
| 9  | 8035           | 8715           | 1611  | 5.0              | BP          | M-05                   | Wytch Farm  | RU en tierra         |
| 10 | 7974           | 8530           | 1616  | 4.9              | Total       | AS-3                   | Ara         | Argentina            |
| 11 | 7967           | 8892           | 1633  | 4.9              | BP          | M-15                   | Wytch Farm  | RU en tierra         |
| 12 | 7853           | 9327           | 2770  | 2.8              | Norsk Hydro | 30/6-C-26 <sup>a</sup> | Oseberg     | Noruega              |
| 13 | 7679           | 8193           | 1503  | 5.1              | Total       | CS-2                   | Kaus        | Argentina            |
| 14 | 7652           | 8303           | 1656  | 4.6              | BP          | M-9Z                   | Wytch Farm  | RU en tierra         |
| 15 | 7645           | 9032           | 2156  | 3.5              | Maersk      | MFF-19C                | Dan         | Dinamarca            |
| 16 | 7571           | 8367           | 2072  | 3.6              | RWE-DEA     | Dieksand 4             | Mittelplate | Alemania             |
| 17 | 7566           | 8680           | 2847  | 2.6              | Phillips    | 24-3 A-17              | Xijiang     | Mar del Sur de China |
| 18 | 7513           | 8611           | 2831  | 2.6              | Phillips    | 24-3 A-18 st3          | Xijiang     | Mar del Sur de China |
| 19 | 7495           | 8284           | 2058  | 3.6              | RWE-DEA     | Dieksand 3             | Mittelplate | Alemania             |
| 20 | 7377           | 8561           | 2865  | 2.6              | Statoil     | A2 - T-2               | Sleipner    | Noruega              |



**Tabla 3.2. Los 9 pozos con mayor alcance extendido del campo Wytch Farm.**

| # | Desp. Horiz. m | Prof. Medida m | PVR m | Operadora | Pozo  | Relación del alcance | Área         |
|---|----------------|----------------|-------|-----------|-------|----------------------|--------------|
| 1 | 10730          | 11278          | 1637  | BP        | M-16Z | 6.5                  | RU en tierra |
| 2 | 10114          | 10658          | 1605  | BP        | M-11  | 6.3                  | RU en tierra |
| 3 | 8938           | 9557           | 1795  | BP        | M-14  | 4.9                  | RU en tierra |
| 4 | 8035           | 8715           | 1611  | BP        | M-05  | 5                    | RU en tierra |
| 5 | 7967           | 8892           | 1633  | BP        | M-15  | 4.9                  | RU en tierra |
| 6 | 7652           | 8303           | 1656  | BP        | M-9Z  | 4.6                  | RU en tierra |
| 7 | 6818           | 7450           | 1600  | BP        | M-03  | 4.3                  | RU en tierra |
| 8 | 6760           | 7522           | 1598  | BP        | M-02  | 4.2                  | RU en tierra |
| 9 | 5994           | 6876           | 1623  | BP        | M-06  | 3.7                  | RU en tierra |

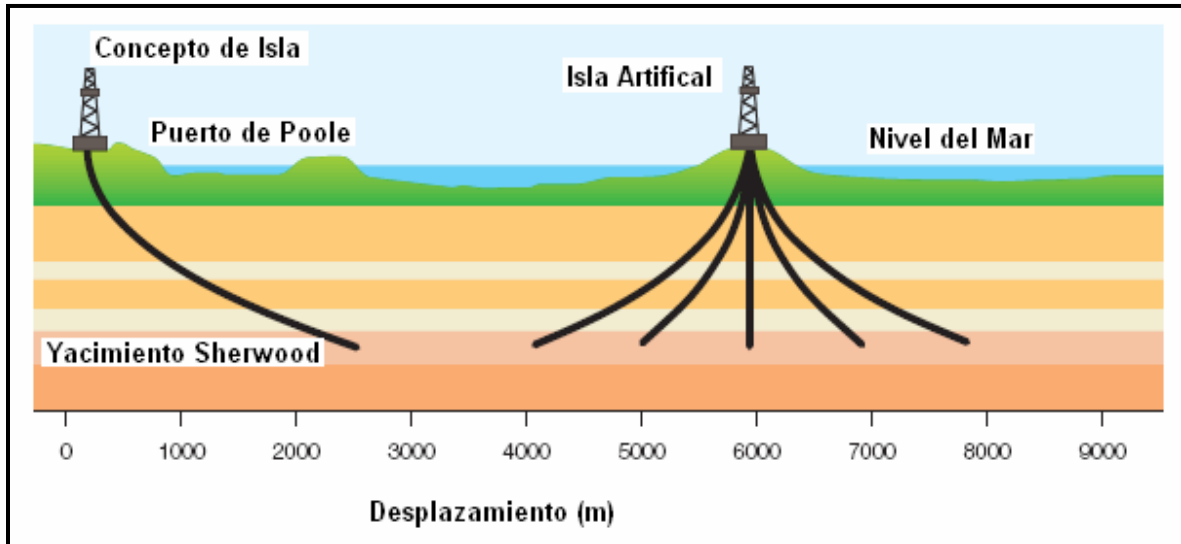


**Figura 3.1. Radio de perforación del campo Wytch Farm, pozos de alcance extendido del sitio F a M a 10 Km de la Península del Puerto de Poole.**

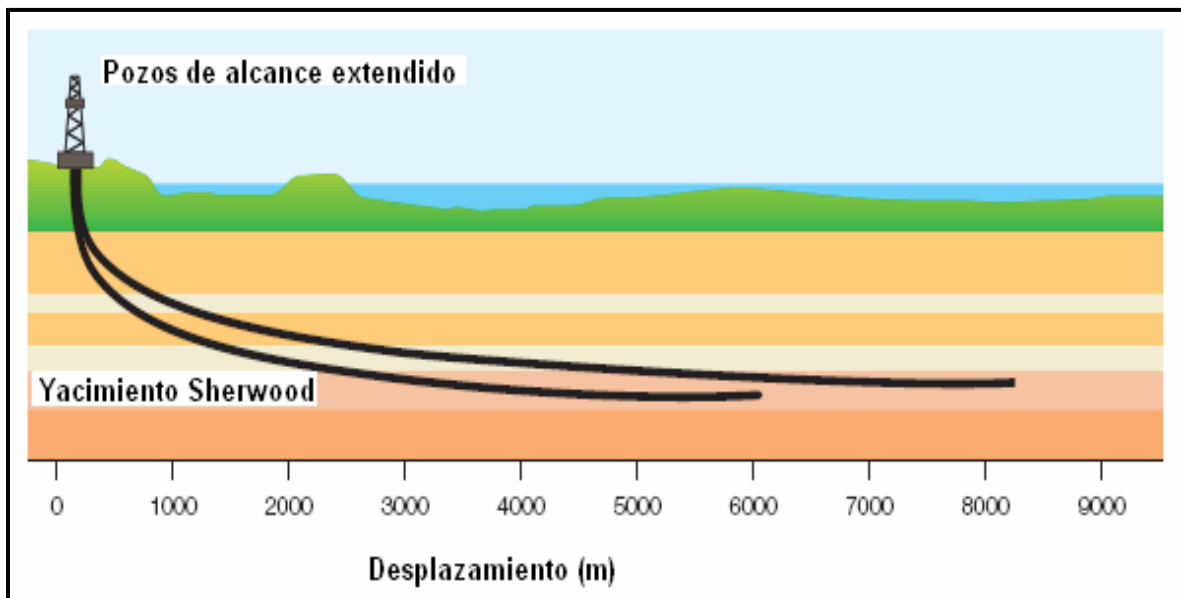
### 3.1.2. PROPUESTAS DE PERFORACIÓN CAMPO WYTCH FARM

En 1990 la operadora British Petroleum (BP) analizó el método para producir en pozos marinos desde el yacimiento Sherwood, incluyendo la evaluación de colocar una plataforma o construcción de una isla artificial. El campo se sitúa cerca de una reserva natural visitada por turistas. Así que cualquier plan de desarrollo tenía que satisfacer estéticamente con la mínima afectación sobre el área. Así también se tenían que seguir las estrictas regulaciones ambientales. El plan inicial de la isla artificial con pozos convencionales costaría 330 millones de dólares y el de perforar desde tierra pozos de alcance extendido sería menos de la mitad, serían 150 millones de dólares menos y sería la mejor planeación en cuanto a protección ambiental. Además, el uso de pozos de alcance extendido aceleraría la producción por 3 años<sup>[2]</sup>.

La **Figura 3.2** muestra el plan inicial con una isla artificial y con pozos direccionales con desplazamientos de 2,000 m y la **Figura 3.3** muestra el plan final que fue el que se llevó a cabo con pozos de alcance extendido con desplazamientos de 8,300 m.



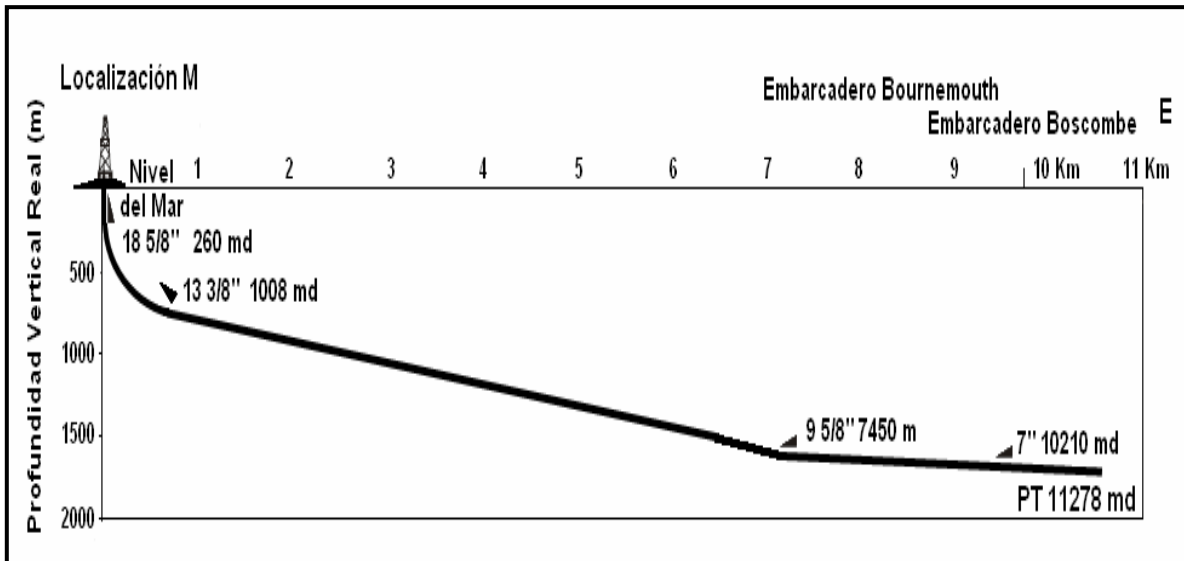
**Figura 3.2.** Propuesta inicial, concepto de isla artificial con pozos direccionales sencillos.



**Figura 3.3.** Propuesta final, planeación de pozos de alcance extendido con menor impacto ambiental.

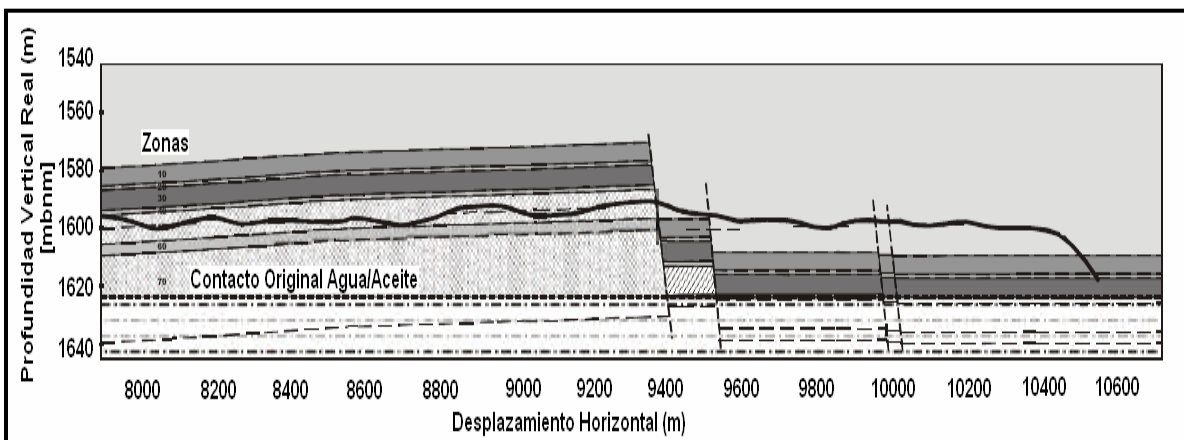
### 3.1.3. POZO WYTCH FARM M-16Z

Este pozo tiene un desplazamiento horizontal de 10,730 m con una relación de alcance de 6.5 (el desplazamiento horizontal entre la profundidad vertical). En la **Figura 3.4** se muestra el perfil de este pozo.



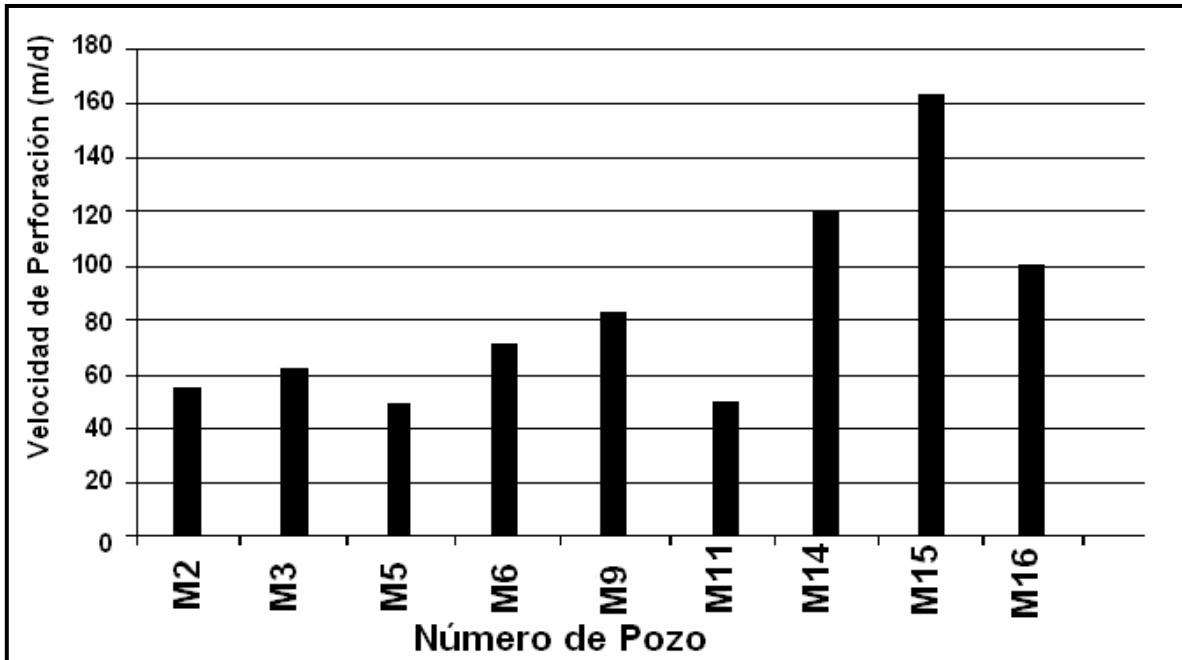
**Figura 3.4.** Trayectoria del pozo Wytch Farm M-16Z.

En la **Figura 3.5** se muestra claramente la precisión direccional que tuvieron que tener para atravesar la sección del yacimiento navegando en un espesor de tan solo 10 m de 8000 m a 9400 m y de 20 m de 9400 m a 10730 m de desplazamiento total. El contacto agua/aceite se encuentra muy cerca de 1620 m verticales sobre el nivel del mar y la arena productiva a 1600 m<sup>[3]</sup>. De haber alcanzado el contacto de agua hubiera resultado catastrófico.



**Figura 3.5.** Sección Final del Pozo M-16Z en el agujero de 8 1/2”.

En la **Figura 3.6** se observa el promedio diario de la velocidad de perforación de la sección de 8 ½” de los 9 pozos con mayor alcance extendido del Campo Wytch Farm, en donde se observan velocidades de perforación favorables y en los pozos que se desee planear se tendrán que considerar estas velocidades para tener un panorama mas claro.



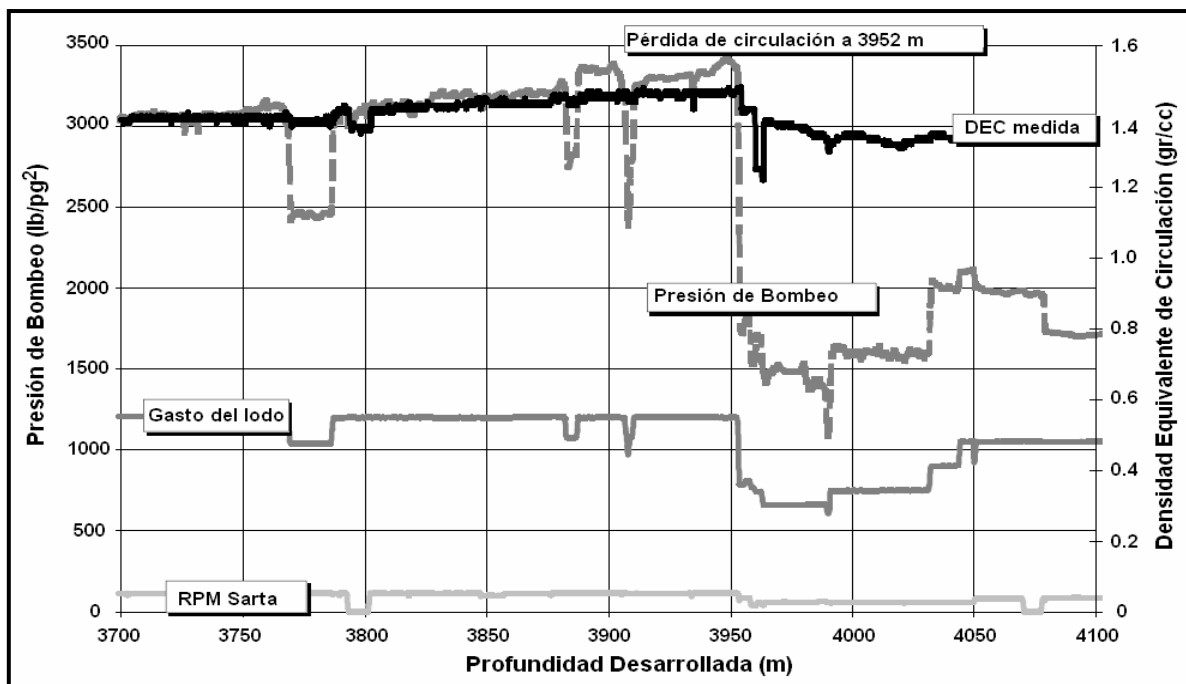
**Figura 3.6.** Promedios de velocidades de perforación del campo Wytch Farm en la sección de 8 ½”.

### **DENSIDAD EQUIVALENTE DE CIRCULACIÓN POZO WYTCH FARM M-16Z**

En cuanto a la densidad equivalente de circulación, se colocó un dispositivo PWD (Presión Mientras se Perfora) para tener la presión en el espacio anular mientras se perforaba y prevenir las pérdidas de circulación. Se requería mantener la Densidad Equivalente de Circulación (DEC) abajo del gradiente de fractura. Los pozos de Wytch Farm eran perforados con una densidad de 1.25 gr/cc en la sección de 12 ¼” pero en este caso la DEC se incrementó a 1.5 gr/cc. Similarmente en la sección de 8 1/2” el fluido de perforación era de 1.0 gr/cc con una DEC de 1.3 gr/cc<sup>[3]</sup>. La operadora trabajó abajo del gradiente de fractura que era conocido. Se atravesaron fallas y en esos casos el gradiente de fractura no se puede predecir como tampoco en las formaciones depresionadas, donde se trabaja con una densidad baja sin llegar al límite, evitando fracturar la formación.

Así, la importancia de usar datos a tiempo real del PWD fue claramente observada en la sección de 12 ¼” del pozo M-16Z, donde antes de llegar a perforar el metro 3,952 se perdió la señal del PWD y se continuó perforando observando una pérdida de circulación. Posteriormente se extrajo la memoria del PWD, como se muestra en la **Figura 3.7**, el registro de memoria donde la DEC no se observó en superficie. Sin los datos a tiempo real de la DEC la prioridad era mantener una DEC baja, pero como puede verse a 3,952 m se tenía 1.4 gr/cc y por las condiciones de operación se incrementó a 1.5 gr/cc, lo que ocasionó la pérdida de circulación, para ello los parámetros en superficie no indicaron un incremento significativo de la DEC en el fondo del pozo. El poco incremento de la presión de la bomba no fue considerado significativo en superficie, pero para la formación si, manifestándose en forma de pérdida de circulación, después de obtener los datos de memoria se observó diferente el problema, debido a que la realidad fue que se incrementó una décima la densidad del lodo para levantar los recortes, ocasionando un incremento gradual en la DEC y subsecuentemente la pérdida de circulación. El incidente resultó con un costo de lodo y tiempo de equipo de aproximadamente USD \$750,000 para la operadora<sup>[3]</sup>.

En el caso de la pérdida se bombeo cemento para colocar un tapón con la misma sarta de perforación sin realizar ningún viaje. Esto porque un viaje para cambiar la sarta y colocar un trompo difusor en la punta tardaría 48 horas. El cemento que se bombeo paso a través del ensamble de fondo, el cual contenía herramienta rotatoria, motor de fondo, MWD/LWD y PWD, resultando en una operación exitosa<sup>[3]</sup>.

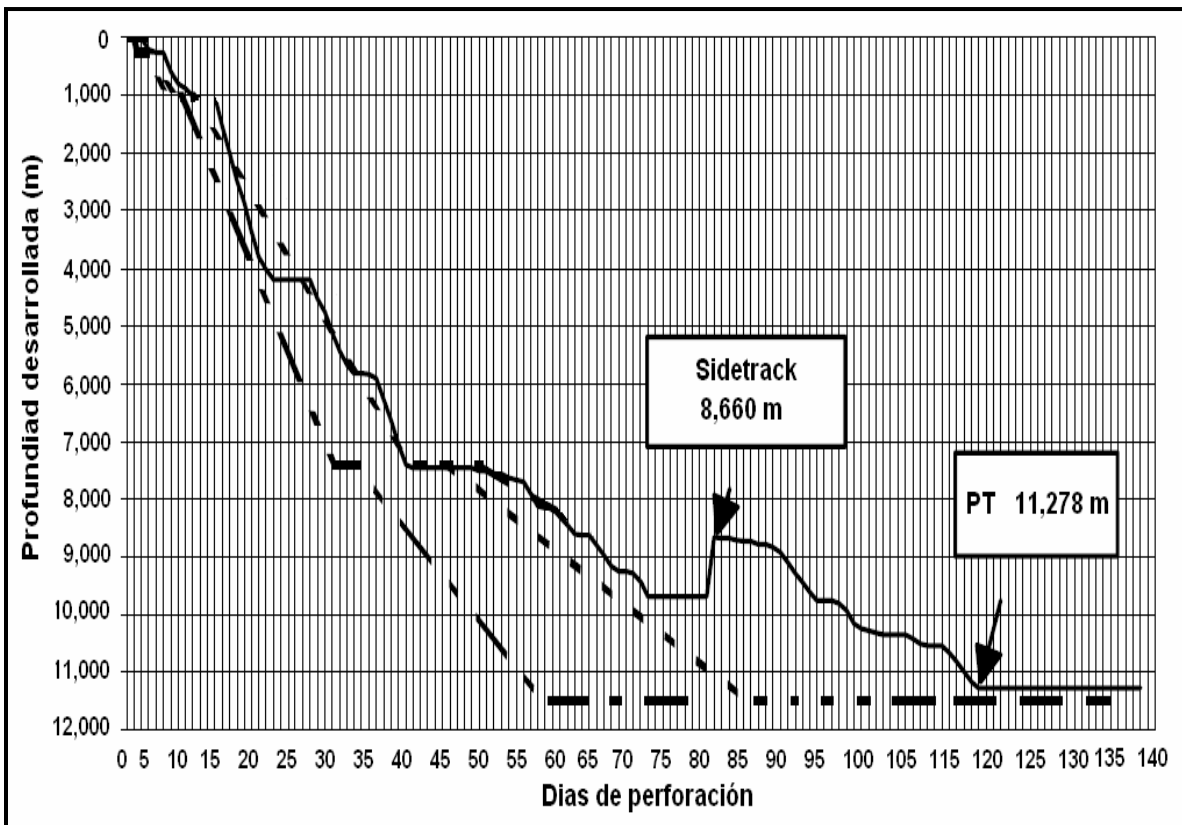


**Figura 3.7.** Gráfica de los parámetros medidos cuando ocurrió la pérdida de circulación, sobrepuestos sobre los datos de DEC obtenidos posteriormente.

## TIEMPOS DE PERFORACIÓN POZO WYTCH FARM M-16Z

Los tiempos de perforación para el pozo M-16Z se ilustran en la **Figura 3.8** donde se observa claramente la ventana que se realizó debido a la pérdida de circulación y posteriormente continuaron los trabajos exitosamente sin ningún otro contratiempo, alcanzando la profundidad medida de 11,278 m en 116 días. Esta ventana (sidetrack) atrasó los trabajos alrededor de 24 días para volver a alcanzar la profundidad anterior<sup>[3]</sup>.

En la **Figura 3.8** se observa que la primera curva punteada de la izquierda es la mejor para el campo calculada con límite técnico, la segunda de la izquierda es la planeada y la curva continua es la real. Este pozo muestra claramente como por un pequeño error se pueden tener grandes problemas como lo fue el no hacer un viaje para cambiar el PWD dañado, reflejándose en cuantiosas pérdidas y problemas operativos subsecuentes.



**Figura 3.8.** Gráfica del profundidad vs tiempo de perforación del pozo Wytch Farm M-16Z.

---

## 3.2. MAR DEL SUR DE CHINA CAMPO XIJIANG 24-3

El campo Xijiang 24-3 esta situado a 130 Km al Sureste de Hong Kong con un tirante de agua de 100 m. Los yacimientos vecinos producen un aceite crudo de 34 a 38 °API con un punto de fluidez a una temperatura de 32 a 43 ° Celsius (90 a 110° Fahrenheit)<sup>[4]</sup>.

Al buscar ejemplos de pozos de alcance extendido donde se mostrara la experiencia en los trabajos de perforación se seleccionó el pozo Xijiang 24-3 A-14, el cual describe de forma clara las operaciones que se realizaron y los problemas encontrados en la perforación, se encuentra en la posición número 8 de la **Tabla 3.1**, con 8,062 m de alcance, con una relación de 2.7 el desplazamiento horizontal/ la profundidad vertical. Lo más relevante de este pozo es que en la literatura se reportan los principales errores que cometieron al realizar los trabajos de perforación y que deberán tomarse en cuenta para futuras intervenciones poniendo especial interés en su planeación.

### 3.2.1. DESCRIPCIÓN DEL CAMPO XIJIANG 24-3

En esta área se descubrieron los campos Xijiang 24-3 y Xijiang 30-2. Se instalaron 2 plataformas marinas y el desarrollo de los campos comenzó en 1994. Se perforaron un total de 26 pozos incluyendo 2 pozos horizontales, perforándose y terminándose en el verano de 1996 <sup>[5]</sup>.

El pozo Xijiang 24-3 A-14 estaba marginado en el Mar del Sur de China, la operadora perforó zonas de estratos de aceite en este pozo debajo de 2,500 metros verticales dentro de las formaciones Hanjiang. Las pruebas de formación indicaron que la arena de aceite estaba normalmente presurizada con alta porosidad y permeabilidad. El aceite crudo era parafínico sin gas asociado. Las arenas de estos yacimientos pueden ser divididas en dos grupos: superior e inferior. El grupo de la arena superior tenía características de manejo de agua marginal con alta capacidad de fluir, el grupo de la arena inferior tenía características de manejo de agua de fondo con menor porosidad y permeabilidad<sup>[5]</sup>.

Se decidió aplicar esta tecnología para desarrollar un Campo llamado XJ 24-1 el cual esta localizado a 8 Km. al Sur de una plataforma marina ya existente XJ 23-3. El campo XJ 24-1 fue descubierto a finales de 1985. Se tenía la opción de desarrollar el campo con plataformas satélites y terminaciones marinas, pero debido al tamaño del campo no fue económicamente rentable. La factibilidad del proyecto se cuestionó debido a que solamente se perforaría un pozo el XJ 24-3-A-14 y las fuentes de información eran limitadas en el Sureste de Asia. Este proyecto fue terminado en tiempo y forma excediendo las expectativas del alcance del objetivo. Este pozo fue perforado y terminado el 10 de Junio de 1997 en solo 101

días y con una profundidad medida de 9,238 m y un desplazamiento horizontal de 8,063 m<sup>[5]</sup>.

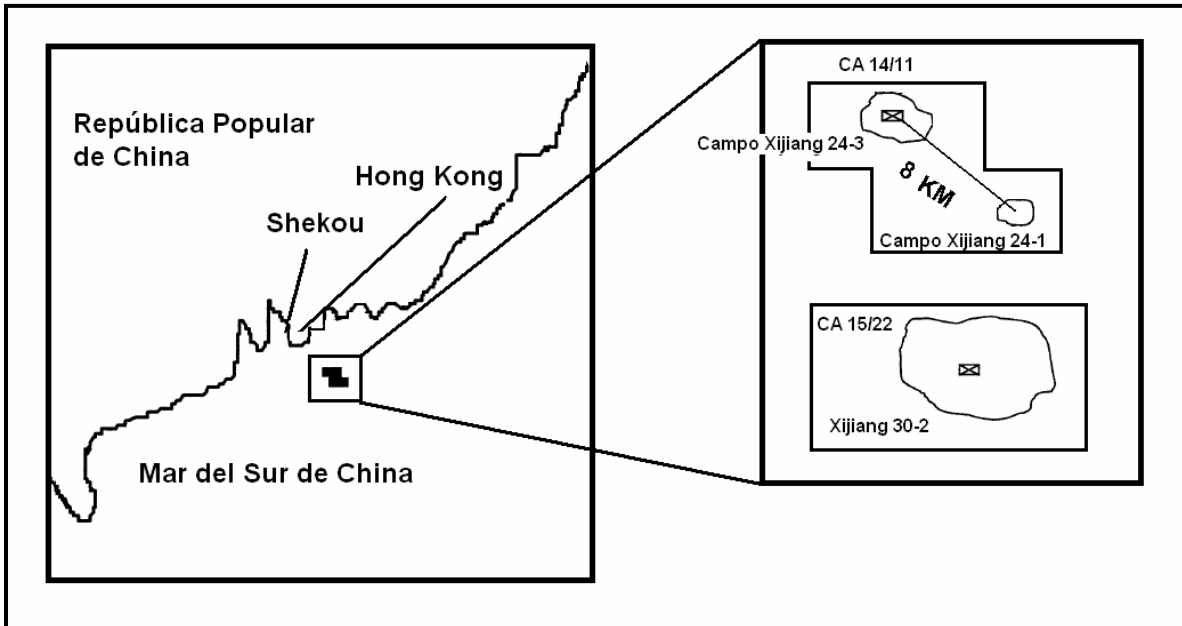


Figura 3.9. Localización geográfica del Campo Xijiang.

### 3.2.2. PROPUESTAS DE PERFORACIÓN CAMPO XIJIANG 24-3

La operadora pensó en desarrollar otros campos junto con el XJ 24-1 desde plataformas marinas satélites pero esto no fue económicamente rentable, debido al tamaño del campo. Para 1995, la aplicación de la tecnología de alcance extendido animó grandemente la posibilidad de perforar estos pozos para desarrollar el campo Xijiang 24-1 desde una plataforma ya existente. Se analizó la factibilidad de perforar un pozo de alcance extendido incluyendo los requerimientos de aumentar los equipos ya existentes. La conclusión del estudio de factibilidad indicaba un 69% de oportunidad de éxito del proyecto<sup>[5]</sup>.

### PLANEACIÓN DEL PROYECTO

Se planeó perforar un pozo de alcance extendido desde una plataforma ya existente Xijiang 24-3 para atravesar todas las arenas de aceite localizadas a 8 kilómetros de distancia de la Plataforma 23-3. Esta plataforma originalmente se requirió para 3 objetivos, estos fueron las arenas H5A, H10B y H12, teniendo una estructura anticlinal de un área objetivo de 75 m de radio. Para alcanzar este objetivo, el punto de inicio para empezar a desviar el pozo sería a 430 m en la sección del agujero de 16" para colocar la TR de 13 3/8" a 1,630 m alcanzando un ángulo inclinación de 80°. Requiriendo una construcción de 2°/30 m de severidad, para minimizar el torque y arrastre en la sección tangente y sección final. Una vez



---

que se alcanzó el primer objetivo, se requirió dejar caer el ángulo de 80° a 64° hasta la profundidad total para asegurarse que todas las arenas del yacimiento serían atravesadas<sup>[5]</sup>.

## **FACTORES IMPORTANTES EN LA PLANEACIÓN DE LA PERFORACIÓN**

Existen diversos factores que intervienen en la planeación de la perforación de pozos de alcance extendido, se describen a continuación los que la operadora de perforación consideró como los más importantes, así como las características de estos con datos reales del pozo Xijiang 24-3 A-14<sup>[5]</sup>:

- Estabilidad del agujero

La estabilidad de agujero fue la principal preocupación porque 2 de 3 modelos corridos con estudios de factibilidad indicaron que no debería de ser perforado este pozo. Se concluyó que no deberían ser perforados a menos que la Densidad Equivalente de Circulación del lodo pudiera mantenerse menor de 1.24 gr/cc (como máxima) y la densidad del fluido de perforación estar entre 1.06 gr/cc y 1.15 gr/cc, debido a ello el rango de operación de la densidad del lodo era muy estrecho.

- Limpieza de agujero

La limpieza de agujero fue otra preocupación estando la densidad del lodo relativamente baja. El éxito de ésta limpieza fue posible por el ajuste de la reología del lodo, usando un alto gasto del fluido y rotando la tubería de perforación continuamente. Se tuvieron problemas de fallas de la manguera de la bomba de lodos a mas de 4,200 psi, por lo que se puso especial interés en controlar la reología del lodo y rotar continuamente la tubería debido a que el gasto del fluido y densidad del lodo eran limitados por dicha presión.

- Minimización de torque y arrastre

La minimización de torque y arrastre es crítica para el éxito de cualquier pozo de alcance extendido, en el caso del pozo Xijiang 24-3 A-14, se basaron sobre los resultados de los modelos de torque y arrastre usando datos de pozos excéntricos, el equipo fue mejorado para conocer los requerimientos de torque para rotar la sarta de perforación. La reducción de torque y arrastre es una parte importante en la planeación y ejecución de un proyecto. En el proyecto fueron tomadas diversas acciones, como controlar la severidad de las patas de perro en la construcción de la sección de la curva y en la sección tangente, usando lodo base aceite con adicionales baches de barrido e instalando centradores (protectores) no rotatorios en la tubería de perforación.

- Introducción de la tubería de revestimiento de 9 5/8"

De acuerdo a la capacidad del equipo y de almacenamiento del patio de tuberías, la máxima longitud de la sección sería de 7000 m, la sección era muy larga por lo que se requería reducir el arrastre de la TR de 9 5/8". Para solucionar este problema se utilizaron 2 técnicas, la primera fue instalar centralizadores rotatorios en cada junta de la TR ya que la fricción al rotar es mas baja que la fricción al resbalar; la segunda fue instalar un cople flotador e introducir 2,146 m de TR sin fluido, así que el peso efectivo de la TR en la sección tangente debería de ser reducido. Se utilizó densidad de lodo de 1.92 gr/cc para llenar la TR en la sección vertical al poder desplazar con mayor facilidad esta. La gráfica de la carga al gancho vs la profundidad se observa en la **Figura 3.10** al correr la TR de 9 5/8".

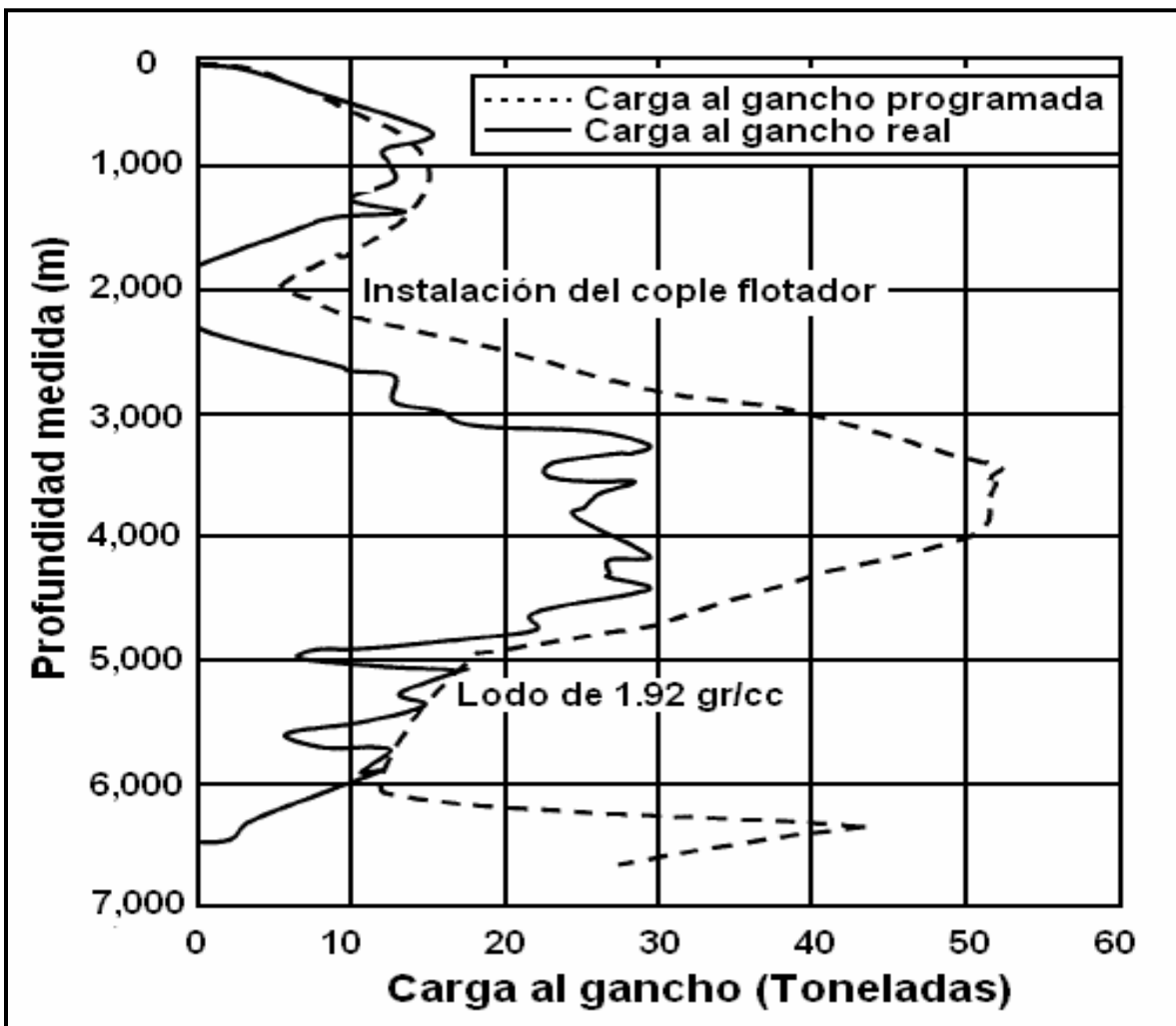


Figura 3.10. Gráfica de carga al gancho vs profundidad en la introducción de la TR de 9 5/8".

- Desviaciones

Debido al tamaño de la estructura del yacimiento, la tolerancia para que se alejara el objetivo se colocó en un radio de 75 m, por lo que se observó una pequeña pero aceptable diferencia entre la curva planeada y la real como se puede observar en las **Figuras 3.11 y 3.12**, para tener mayor certidumbre la exactitud del MWD se verificó con un giroscópico. El ángulo de inclinación de  $0^\circ$  a  $80^\circ$  fue construido con una severidad de  $2^\circ/30$  m en la sección del agujero de 16". El inicio de la desviación se programó a 442 m y se construyó la primera curva con  $2^\circ/30$  m hasta alcanzar  $79.33^\circ$ , finalizando a 1,632 m, para posteriormente construir una sección tangente hasta 8,575 m, finalmente el ángulo de inclinación cayó hasta  $67.5^\circ$ <sup>[6]</sup>.

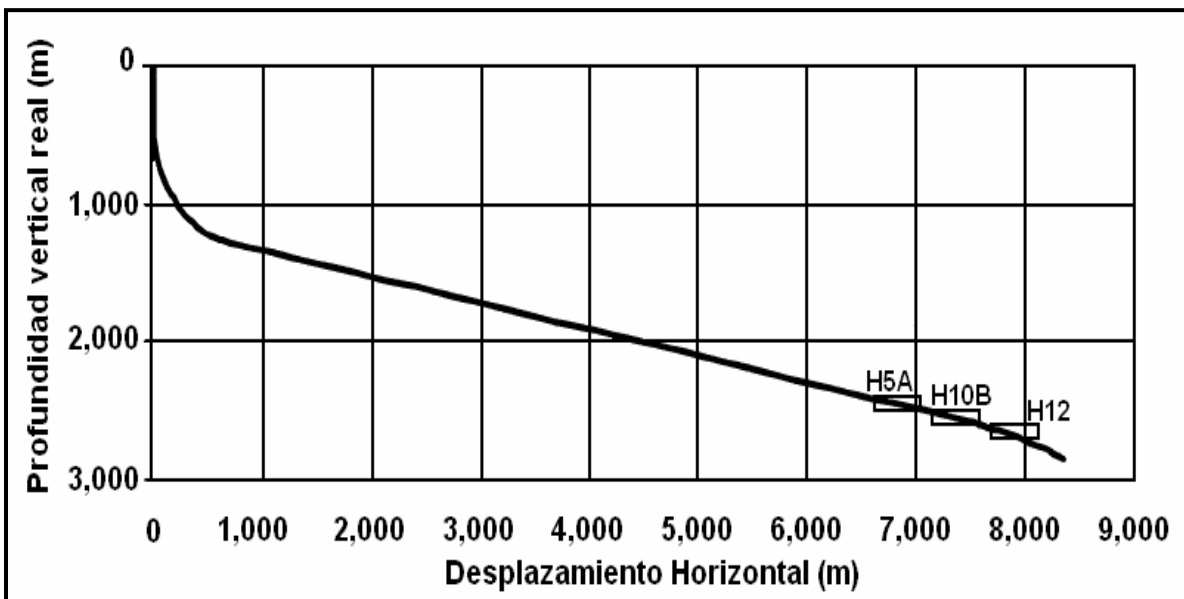


Figura 3.11. Perfil de la trayectoria planeada del pozo Xijiang 24-3 A-14.

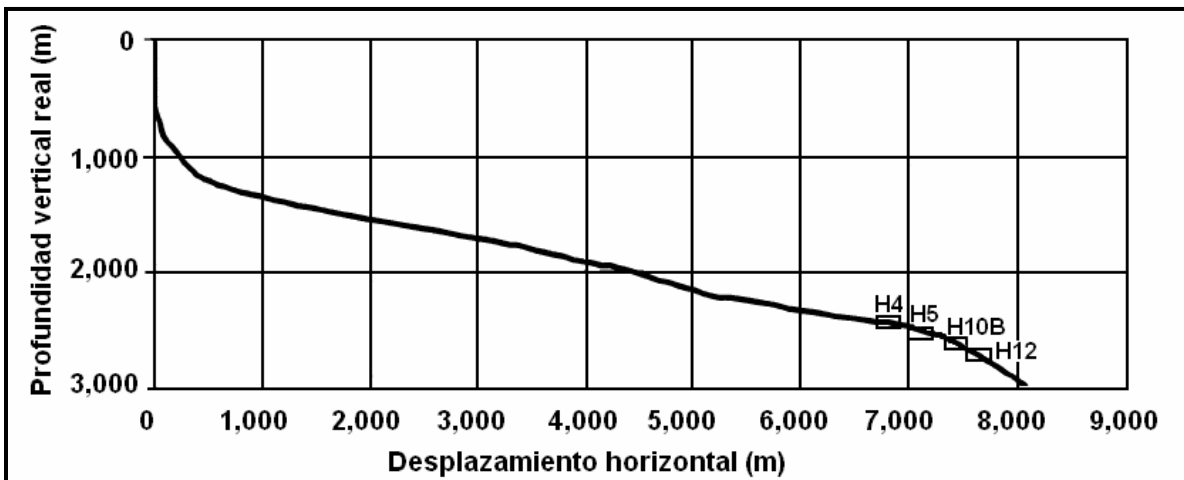


Figura 3.12. Perfil de la trayectoria real del pozo Xijiang 24-3 A-14.

- 
- Selección de barrenas de cortadores fijos compuestos de policristalino de diamante (PDC)

Las barrenas PDC son utilizadas comúnmente en pozos de alcance extendido para reducir los tiempos de viajes. Durante el desarrollo de la perforación del campo Xijiang, 2 barrenas PDC tuvieron resultados negativos y las sacaron fuera del pozo, ambas fallaron al penetrar menos de 1,500 m. Fue cuestionable si era económicamente rentable utilizar una barrena PDC al principio de la sección del agujero<sup>[5]</sup>. Los tiempos de viaje son muy significativos en este tipo de pozos debido a las secciones muy largas.

## DEFICIENCIAS ENCONTRADAS

Se presentaron diversos retos en este pozo ya que era el primer pozo de alcance extendido en esta área. Se contaba con:

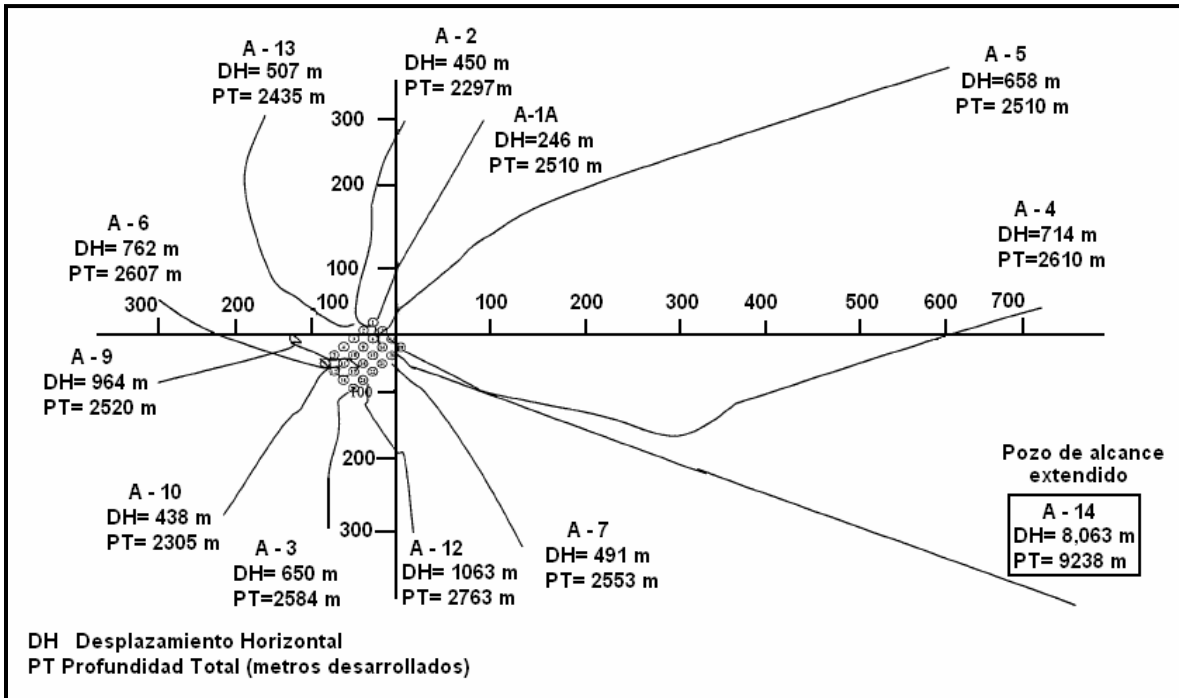
- Equipos inexpertos en las herramientas y técnica de perforación de alcance extendido
- Infraestructura local limitada
- Tamaño insuficiente en el equipo y plataforma de perforación
- Condiciones geológicas desconocidas
- Incertidumbre para alcanzar el objetivo.

### 3.2.3. POZO XIJIANG 24-3 A-14

El programa del pozo Xijian 24-3 A-14 se planeo para optimizar los parámetros y secuencia de operaciones, también se requirió flexibilidad para cualquier cambio en las operaciones al estar perforando. Este pozo debería perforarse a 9,450 m de profundidad desarrollada con un desplazamiento horizontal de 8,170 m con perfil de trayectoria tipo “S” como se muestra en la **Figura 3.11**.

La **Figura 3.11** muestra el perfil planeado de la trayectoria del pozo Xijiang 24-3 A-14 y la **Figura 3.12** el perfil real, observando que se ajustó esta trayectoria a la planeada y se alcanzaron los objetivos con un defasamiento aceptable tomando en cuenta el diámetro de los objetivos.

Se trazaron las trayectorias de los diferentes pozos de la plataforma Xijiang 24-3, (esta gráfica se conoce también como araña), con el fin de verificar la anticolidión de los pozos. En la **Figura 3.13** se pueden observar todos los pozos de la plataforma en una vista de planta, en la cual en ningún momento se tuvo la incertidumbre de colisionar con otro pozo. El pozo Xijiang 24-3 A-14 fue el primer pozo de alcance extendido en esa área y el primer pozo perforado en una plataforma satélite<sup>[4]</sup>.



**Figura 3.13. Trayectorias de pozos de la Plataforma Xijiang 24-3.**

### **EQUIPO DE PERFORACIÓN UTILIZADO EN EL POZO XIJIANG 24-3 A-14**

El equipo de perforación colocado sobre la plataforma Xijiang 24-3 había sido diseñado para desarrollar los pozos 24-3. El pozo más profundo que había perforado este equipo era con una profundidad desarrollada de 2,770 m, y un desplazamiento menor a 1000 m. Para perforar un pozo de alcance extendido se requería tener mayor capacidad en: la torre de perforación, las bombas de lodo, líneas de alta presión y líneas de retorno y en el top drive. **La Tabla 3.3** muestra las mejoras que se le hicieron al equipo para poder perforar pozos de alcance extendido<sup>[5]</sup>.

**Tabla 3.3 Mejoras realizadas al equipo de perforación para perforar el pozo Xijiang 24-3 A-14**

| <b>Parte del Equipo</b> | <b>Antes de la mejora</b>   | <b>Después de la mejora</b>   |
|-------------------------|---|---|
| Torre de perforación    | Capacidad de 454 toneladas de carga estática con 12 líneas, con una capacidad para almacenar 4,570 m de tubería de perforación de 5”. | Capacidad de 682 toneladas de carga estática con 14 líneas, con una capacidad para almacenar 7,000 m de tubería de perforación de 5 1/2”.                                     |
| Block viajero           | 500 ton   | 650 ton   |
| Línea de perforación    | 1 3/8”  | 1 1/2 “   |
| Bombas de lodos         | 2 FB 1600 de 5000 psi.  | 3 FB 1600 de 7500 psi.  |
| Tubería de alta presión | 5000 psi de presión de trabajo  | 7500 psi de presión de trabajo  |
| Top Drive               | Velocidad con torque continuo máximo de 43,000 pie-lbs a 100 RPM  | Velocidad con torque continuo máximo de 51,000 pie-lbs a 100 RPM  |
| Control de sólidos      | 2 Temblorinas, 1 centrífuga<br>1 desarenador, 1 desedimentadora   | 5 Temblorinas<br>2 centrífuga   |
| Malacate                | 2000 caballos de fuerza   | 2000 caballos de fuerza   |
| Almacenamiento de lodo  | 220 metros cúbicos de lodo disponibles  | 220 metros cúbicos de lodo disponibles, 160 metros cúbicos de lodo bentonítico en tanque de almacenamiento, 80 metros cúbicos de lodo base aceite en tanque de almacenamiento |
| Tubería de perforación  | 5” Grado “G”<br>3 1/2” Grado “E”  | 5 1/2” Grado “S”, 5” Grado “G”<br>3 1/2” Grado “E”  |

## **OPERACIONES DE PERFORACIÓN POZO XIJIANG 24-3 A-14**

Las operaciones de perforación comenzaron en la plataforma Xijiang 24-3, con un conductor existente, los diámetros de las barrenas y tuberías de revestimiento que se usaron se muestran en la **Tabla 3.4**.

**Tabla 3.4. Diámetros de barrenas y tuberías de revestimiento utilizados.**

| <b>Sección</b> | <b>Diámetro Barrena (pulgadas)</b> | <b>Diámetro TR (pg)</b> | <b>Profundidad Prog. (m)</b> | <b>Fluido de perforación</b> |
|----------------|------------------------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Conductor      | ---                                | 24                      | 205                          | Agua de Mar                  |
| Superficial    | 22                                 | 18 5/8                  | 400                          | Agua de mar                  |
| Intermedia     | 16                                 | 13 3/8                  | 1730                         | Base agua                    |
| Intermedia     | 12 1/4                             | 9 5/8                   | 6900                         | Base aceite                  |
| Explotación    | 8 1/2                              | 7                       | 9450                         | Base aceite                  |

---

A continuación se describen las principales operaciones realizadas en cada etapa de perforación del pozo Xijiang 24-3 A-14<sup>[4]</sup>.

## **CONDUCTOR DE 24”**

El conductor era de 24” y se colocó a 57 m por debajo del lecho marino, a 205 m debajo de la mesa rotaria, la colocación se realizó durante la instalación de la plataforma fija Xijiang 24-3. Este conductor fue diseñado originalmente para desarrollar un pozo del campo Xijiang en el cual no se planearía la TR de 18 5/8”. Se soldó una guía dentro del conductor de 24” mientras se introducía. El diámetro de trabajo real del conductor de 24” era de 20.75” por lo tanto, este conductor únicamente permitiría el paso de una barrena de 20” a través de él.

## **SECCIÓN DE AGUJERO DE 22” PARA LA TR DE 18 5/8”**

El cemento del conductor se trituró con una barrena de 20” a 257 m. Se tomó la desviación con un giroscópico, para prevenir una anticolisión con los otros pozos de la plataforma a esa profundidad, el resultado fue satisfactorio y se continuó perforando hasta 401 m. El registro giroscópico de desviaciones fue corrido nuevamente para confirmar la verticalidad del agujero. Para incrementar el espacio anular y para tener un mejor soporte entre la TR de 18 5/8” y el agujero, se amplió el agujero con una rima de 22”. Debido a la limitación del conductor de 24” antes mencionada, para asegurarse de que la TR de 18 5/8” pudiera ser introducida a la profundidad deseada, el diámetro externo de los coples de la TR de 18 5/8” fue reducido de 19.625” a 19.15”. La capacidad de la TR fue también reducida debido a la disminución del cople, desafortunadamente, la TR se colapsó mientras se realizaba la cementación en la tercera conexión de la zapata a la superficie, por lo que la barrena de 16” de la sección siguiente no pasaba. La cima de cemento en el espacio anular no llegó a la profundidad esperada. Esta sección fue perforada con agua de mar y ocasionales baches de barrido de alta viscosidad. Durante la perforación y cementación el retorno de la circulación fue descargado al mar a través de un puerto marino (de circulación) en el conductor de 24” a 88 m de la mesa rotaria.

Esta práctica realizada nos da oportunidad para que en un futuro se ponga especial interés en los diámetros internos de las tuberías de revestimiento y poder seleccionar las herramientas adecuadas que se van a introducir al pozo de acuerdo al diámetro de trabajo de cada TR, para que no lleguen a ocurrir incidentes parecidos, donde se retrasan los trabajos de perforación que implican un costo excedente, además de poner en peligro la vida del pozo. Este es un punto fino debido a que algunas veces aunque sean milímetros los que estamos fuera de especificaciones la recomendación es no continuar con los trabajos y analizar el problema para encontrar solución.

---

## **SECCIÓN DE AGUJERO DE 16" PARA LA TR DE 13 3/8"**

En esta sección se construyó toda la curva direccional, la cual fué planeada para que se construyera con el inicio de la curva de desviación a 436 m de 0° a 79.3° hasta 1,630 m con una severidad de 2°/30 m. Esta sección tuvo una severidad máxima de pata de perro de 3°/30m para minimizar el torque y arrastre. La TR colapsada de 18 5/8" fue reparada con un molino. Una barrena de 16" con sarta navegable con MWD se colocó para direccionar la perforación en esta sección. Esta sección fue perforada con lodo base agua. Se introdujo la TR 13 3/8" hasta la profundidad programada y se cementó hasta la superficie sin problemas.

## **SECCIÓN DE AGUJERO DE 12 1/4" PARA LA TR DE 9 5/8"**

En esta sección se mantuvo el ángulo de inclinación de 79° de la zapata anterior de 16" hasta 6760 m, perforando la sección mas larga de todo el pozo. Se utilizó una sarta navegable con motor de longitud extendida de 9 1/2" con estabilizadores ajustables para mejorar el control direccional. La TP de 5 1/2" S-135 con conexiones de alto torque fue utilizada con protectores no rotatorios en la sección de construcción para reducir el torque. Adicionalmente el diámetro interno de la TP (5 1/2") mejoró la eficiencia hidráulica y consecuentemente se mejoró la limpieza del agujero.

Se perforaron diversas estructuras, la presión de sobrecarga y esfuerzo de la roca variaron, la estabilidad del agujero fue crítica en esta sección. La ventana de operación estrecha de la presión de poro y gradiente fractura limitaban mucho al lodo. Las barrenas PDC fueron una buena opción ya que se vieron mejoradas las velocidades de perforación. Se utilizó un lodo base aceite de baja toxicidad para reducir el torque y arrastre debido a la lubricidad que ayudó a mejorar la estabilidad del agujero.

La perforación en esta sección fue estropeada por una pegadura de tubería de perforación. Mientras se hacía un viaje de limpieza de agujero después de perforar a 5158 m, la tubería se quedó pegada a 4664 m, después de varios intentos por liberar la sarta, se desconectó la tubería en el punto libre dejando el aparejo de fondo en el fondo del pozo. Se colocó un tapón de cemento y se desvió el pozo a 4326 m. Después de este incidente la densidad del lodo se incrementó a 1.14 gr/cc y se termino esa sección con 1.15 gr/cc. Se realizaron viajes frecuentes de limpieza de agujero. Se observó el pozo en las lutitas sin que hubiera otro incidente, perforando hasta 6760 m después de identificar un marcador geológico de la arena H3A. La zapata de la TR fue colocada en lutita a 6752 m.

En la introducción de la TR 9 5/8" se flotó parcialmente la tubería en la sección tangente para reducir el peso efectivo de la TR, esto se logró con un cople flotador en la junta 179. Sobre el cople flotador la TR se llenó con lodo base aceite de densidad de 1.15 gr/cc hasta el tramo 423. La TR restante fue llenada con lodo



base aceite de 1.80 gr/cc. Al meter el tramo 330 se observó que no circulaba el fluido de perforación. Se introdujeron un total de 556 tramos de tubería de 9 5/8". El peso final de la TR fue de 16 toneladas (quitando el peso del block y del top drive).

Se instalaron centralizadores rolares en cada junta de la TR para minimizar el riesgo de pegadura diferencial y disminuir el arrastre axial sobre la TR, la zapata de la TR quedó a 6,752 m. Durante la cementación de la TR 9 5/8" se observó pérdida total de circulación, los trabajos fueron aceptables con los resultados de una prueba en la zapata después de la cementación.

La densidad del lodo que se utilizó en esta sección fue de 1.05 a 1.15 gr/cc y el lodo fue base aceite de baja toxicidad. La **Tabla 3.5** muestra las características del lodo utilizado en esta sección.

**Tabla 3.5. Fluido de perforación utilizado en la sección de 12 ¼" del pozo Xijiang 24-3 A-14**

| <b>Sección del agujero de 12 ¼"</b> |                                  |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| Tipo de lodo                        | Base aceite de baja toxicidad    |
| Densidad                            | 1.05 a 1.15 gr/cc                |
| Viscosidad                          | 100-128 segundos/cuarto de galón |
| Viscosidad Plástica                 | 46-66 lb/100 pies cuadrados      |
| Punto de cadencia                   | 16-24 lb/100 pies cuadrados      |
| Lectura del viscosímetro 6/3        | 14/12                            |
| Estabilidad Eléctrica               | 375 a 465 volts                  |
| Relación agua/aceite                | 80/20 a 72/28                    |

## **SECCIÓN DE AGUJERO DE 8 1/2" PARA LINER DE 7"**

Esta sección también fue perforada con una sarta navegable. El ángulo se mantuvo hasta que se alcanzó el primer objetivo, que era la arena H4A intersecada a 8,033 m en la cresta de la estructura, observando un leve cambio en la trayectoria debido a que la arena se encontró antes de lo esperado. Posteriormente el ángulo fue decrementado para alcanzar los siguientes objetivos. Se encontró hidrocarburos en las arenas H4B, H4d y H4D4, aún cuando en el pozo descubridor del campo, en estas mismas arenas no se encontró hidrocarburos.

Se realizó un cambio en la sarta navegable al perforar a 7,910 m porque la inclinación había alcanzado 86° debido a la tendencia de construir ángulo en la formación de lutita. Se quitó el estabilizador de camisa (abrazadera) del motor y se agregó un LWD para registrar densidad y neutrón porosidad en la sarta navegable. Este ensamble tipo péndulo fue diseñado para que cayera el ángulo en el yacimiento. La relación de caída de ángulo en los primeros 100 m fue de 3°/30 m, esta relación era excesiva. Para ajustarse a los parámetros de perforación y estabilizar la relación de caída de ángulo, esta fue disminuida a un promedio de

---

0.75°/30 m hasta alcanzar 54° de inclinación. Los datos del MWD/LWD pudieron ser transmitidos en tiempo real hasta 9,106 m (metros desarrollados).

La profundidad total del pozo fue alcanzada a 9,238 m, perforando de forma ciega los últimos 132 m debido a que a esa profundidad ya no se tuvo señal de los dispositivos de MWD/LWD. Hubo un desplazamiento horizontal de 8,063 m alcanzando un record con una relación de desplazamiento de 2.7 el desplazamiento horizontal/profundidad vertical y teniendo un gran avance en la perforación de los pozos de esta zona para planear futuros pozos de alcance extendido y superando ese 69% de factibilidad del proyecto.

Respecto al fluido de perforación con que se trabajó en esta sección fue un nuevo tipo de lodo base aceite de baja toxicidad. La densidad que se utilizó en esta etapa fue de 1.09 gr/cc a 1.12 gr/cc. En la **Tabla 3.6** se puede observar las características del lodo de perforación que se utilizaron en esta sección.

**Tabla 3.6. Fluido de perforación utilizado en la sección de 8 1/2" del pozo Xijiang 24-3 A-14**

| <b>Sección del agujero de 8 1/2"</b> |                                |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| Tipo de lodo                         | Base aceite de baja toxicidad  |
| Densidad                             | 1.09 a 1.12 gr/cc              |
| Viscosidad                           | 60-67 segundos/cuarto de galón |
| Viscosidad Plástica                  | 21-28 lb/100 pies cuadrados    |
| Punto de cadencia                    | 12-15 lb/100 pies cuadrados    |
| Lectura del viscosímetro 6/3         | 9/6 a 10/9                     |
| Estabilidad Eléctrica                | 450 a 546 volts                |
| Relación agua/aceite                 | 84/16                          |

La tubería de perforación que se utilizó para esta sección de 8 1/2" fue de 5 1/2" desde la superficie hasta antes de la zapata de 9 5/8" y de 5" en toda la sección del agujero descubierto, manteniendo con ello todos los parámetros dentro del rango posible en cuanto a hidráulica, densidad equivalente de circulación, así como de torque y arrastre.

## **BARRENAS UTILIZADAS EN LA PERFORACIÓN DEL POZO XIJIANG 24-3 A-14**

La primer barrena PDC que se utilizó en este pozo se dañó a 3,225 m encontrando una formación abrasiva dura, esto indicó que existía similitud en las formaciones del campo Xijiang 24-1 de acuerdo a las formaciones abrasivas. Posteriormente se introdujo una barrena tricónica, la cual perforó hasta 5,158 m con una velocidad de penetración de 30 m/hr, desafortunadamente el incidente de atrapamiento de tubería ocurrido en viajes de limpieza a 4,506 m limitó esta barrena, para ello se desconectó la tubería de perforación en el punto libre, quedándose 100 m de la sarta de perforación en el fondo del pozo. Entonces se

desvió el pozo para librar el pez con una barrena tricónica hasta 5158 m. Posteriormente se metieron 2 barrenas PDC para perforar a 6700 m. Se realizaron viajes de limpieza para que no volvieran a ocurrir atrapamientos de la tubería de perforación mientras se perforaba la parte final de esta sección.

## TIEMPOS DE PERFORACIÓN DEL POZO XIJIANG 24-3 A-14

El pozo se perforó en 83 días, 18 después de los 65 planeados debido a la desviación del pozo, atrasando con esto los trabajos de perforación, pero poniendo más atención en la densidad equivalente de circulación y la hidráulica de perforación<sup>(4)</sup>. De lo anterior se considera que el terminar los trabajos de perforación 18 días después es aceptable, tomando en cuenta que es un pozo único y pionero en este campo de pozos de alcance extendido, por lo que se tuvieron algunos problemas pero ninguno tan grave como para abandonar el pozo. En la **Figura 3.14** se muestra la gráfica de tiempos de operación vs profundidad, observando que los 18 días que se perdieron fueron en la desviación del pozo, donde si no hubiese ocurrido tal accidente las curvas real y programada serían las mismas.

**Tabla 3.7. Resumen de barrenas del pozo Xijiang 24-3 A-14**

| Xijiang 24-3 A14 |               |           |                 |                                  |             |           |                        |
|------------------|---------------|-----------|-----------------|----------------------------------|-------------|-----------|------------------------|
| # Barrena        | Diámetro (pg) | Tipo      | Profundidad (m) | Peso sobre barrena (ton) min/Max | RPM min/Max | Gasto GPM | Observaciones          |
| 1                | 20            | Tricónica | 401             | 2/10                             | 80/115      | 702       |                        |
| 2                | 16            | Tricónica | 1731            | 10/20                            | 100/200     | 1000      |                        |
| 3                | 12 ¼          | PDC       | 3225            | 20/30                            | 100/150     | 1060      |                        |
| 4                | 12 ¼          | Tricónica | 3943            | 30/35                            | 80/110      | 830       |                        |
| 5                | 12 ¼          | PDC       | 5158            | 5/25                             | 80/110      | 810       | Pérdida de circulación |
| 6                | 12 ¼          | Tricónica | 4700            | 25/40                            | 60/70       | 865       |                        |
| 7                | 12 ¼          | PDC       | 5972            | 15/30                            | 100         | 866       |                        |
| 8                | 12 ¼          | PDC       | 6760            | 10/30                            | 75/110      | 810       |                        |
| 9                | 8 ½           | PDC       | 7910            | 10/15                            | 100/115     | 603       |                        |
| 10               | 8 ½           | PDC       | 9238            | 15/25                            | 40/100      | 560       |                        |
| 11               | 6             | PDC       |                 |                                  |             |           | Limpieza del liner     |

## TERMINACIÓN DEL POZO XIJIANG 24-3 A-14

Se planeó introducir una tubería corta de 7" hasta la profundidad total de 9,238 m, pero al introducirlo se atoró a la profundidad de 8,552 m, a 680 m de la profundidad deseada. Posteriormente se cementó a esa profundidad alcanzando cubrir el primer objetivo para aislar la zona de agua en la arena H4D y H5. Con el

liner a 8,552 m se cubrieron 7 zonas de aceite y otras 7 zonas de aceite quedaron en agujero descubierto. El único contacto de agua se encontró en medio de la arena H12<sup>[6]</sup>.

Se molió el cemento de la zapata de la tubería corta y se limpió el pozo hasta la profundidad total. En la zona de agua de la arena H12 se colocó un tapón balanceado de cemento entre 9,100 m y 8,961 (139 m), se requería colocar cemento al menos 5 m arriba de la arena H12 y un mínimo de 10 m arriba del contacto agua aceite que se encontraba en dicha arena, el tapón tuvo éxito ya que no se realizaron trabajos posteriores para aislar la zona de agua.

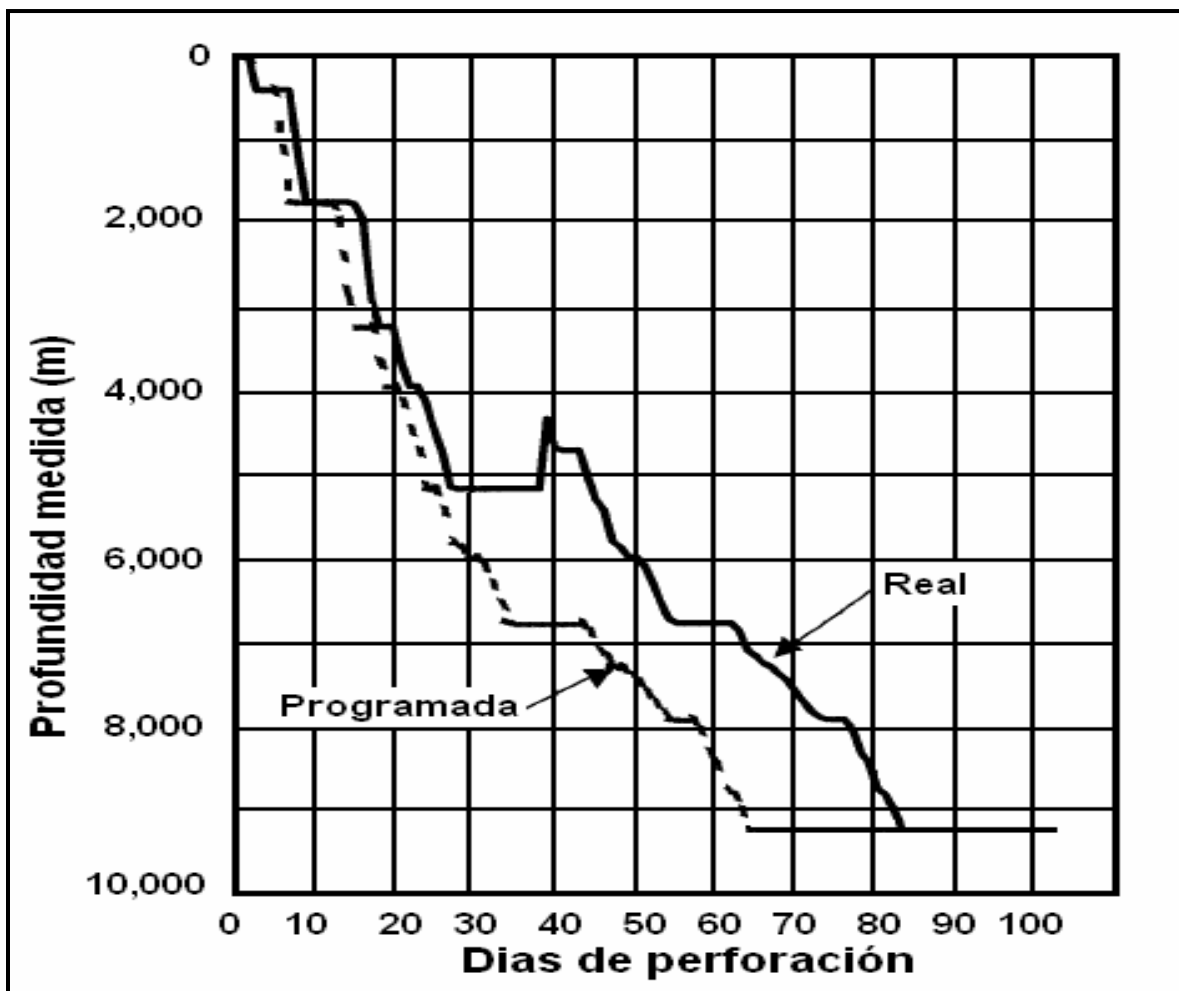
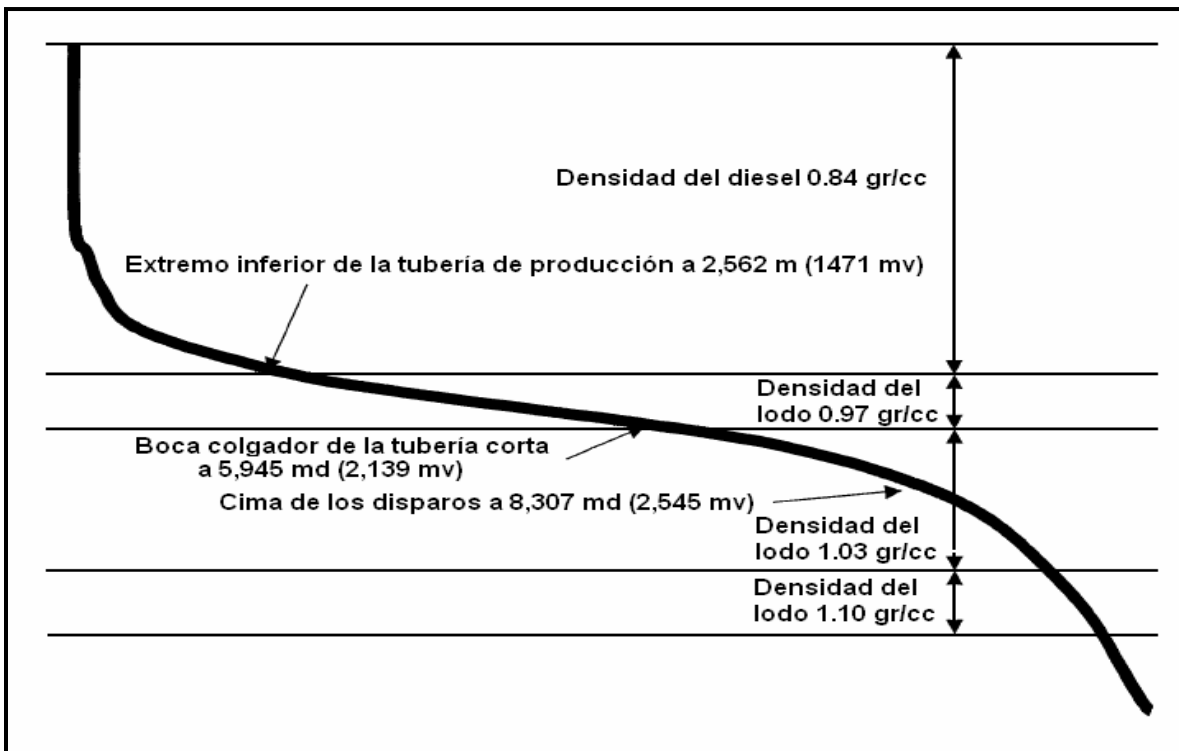


Figura 3.14. Gráfica de profundidad vs tiempo de perforación del pozo Xijiang 24-3 A-14.

El siguiente paso en la terminación fue disparar los intervalos revestidos con la tubería corta de 7". Las dos arenas superiores no fueron disparadas para prevenir la producción potencial de arena debido a la alta porosidad de la misma. En el futuro serían disparadas cuando los otros intervalos estuvieran agotados.

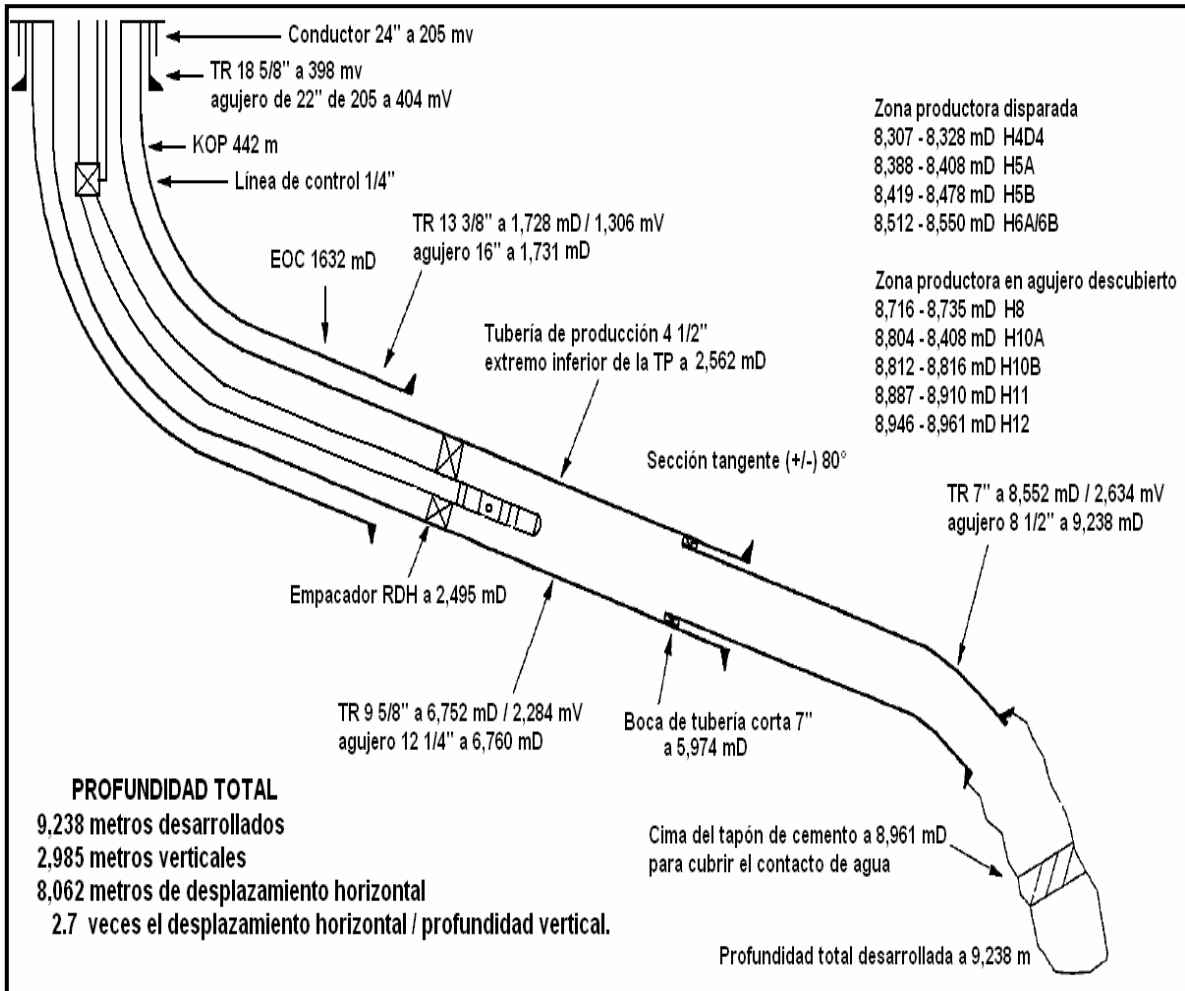
En el diseño se había contemplado incluir una bomba eléctrica sumergible pero al final se decidió omitirla para minimizar el riesgo de la producción de arena y que se colapsara el pozo.

La densidad del fluido que se utilizó en la terminación del pozo se muestra en la **Figura 3.15**. La presión hidrostática resultante fue suficiente para el sobre balance de 1 gr/cc de presión de poro para introducir la sarta de terminación. Se utilizó diesel para llenar la tubería de producción e iniciar el flujo. Se colocó lodo de 0.97 gr/cc en la cima de los disparos, lodo de 1.03 gr/cc en la zapata de la tubería corta y lodo de 1.10 gr/cc en el agujero descubierto. La densidad de la mezcla de aceite fue calculada para proporcionar el bajo balance necesario para iniciar el flujo. La presión inicial de la tubería de producción fue de 450 psi., sin embargo, como la densidad del diesel era muy ligera en la sección vertical del pozo este fue desplazado por lodo cayendo la presión a 40 psi. Posteriormente la presión comenzó a incrementarse debido a la entrada de fluidos de la formación al pozo. El pozo continuó limpiándose de forma natural. Después de varios días observando el pozo, el gasto de producción se estabilizó a 7,000 Barriles de aceite por día con una presión en la tubería de producción de 390 psi, cumpliendo con todas las expectativas de producción de aceite, haciendo rentable el proyecto, perforando un pozo de alcance extendido y además con una considerable producción de aceite. Después de todos los problemas encontrados en cuanto a capacidad de equipo, atropamiento de la tubería y la tubería corta que no bajó a la profundidad programada el Pozo Xijiang 24-3 A-14 fue un éxito<sup>[6]</sup>.



**Figura 3.15.** Distribución de fluidos de diferentes densidades en la terminación del pozo antes de manifestarse los hidrocarburos.

En la **Figura 3.16** se muestra el estado mecánico así como las zonas productoras en agujero entubado y agujero descubierto. Se observa que en el quiebre de trayectoria se quedó atorado el liner 686 m antes de llegar al fondo. En el futuro se tienen que tomar en cuenta los quiebres de trayectoria para que no ocurran este tipo de problemas y para que las terminaciones no sean tan complicadas.



**Figura 3.16. Estado mecánico del pozo Xijiang 24-3 A-14.**

---

## 4. IMPORTANCIA DE LA LIMPIEZA DE AGUJERO

En este capítulo se describe la limpieza del agujero y como afecta principalmente a éste, al final se pone como ejemplo un caso crítico de la limpieza de agujero en la Cuenca Terciaria de Veracruz.

Al perforar pozos direccionales y horizontales, resulta de gran importancia la limpieza del agujero. En el caso de pozos de alcance extendido la limpieza del agujero es crítica debido a que se requieren pozos más grandes y más largos, ya que tendremos mayor arrastre en la sarta de perforación, mayor torque y secciones mas largas de agujero descubierto. Si se quiere llegar al objetivo se tendrá que ser muy cauteloso en la limpieza del pozo y estar seguros que todos los recortes salgan a la superficie, para que con ello no se tengan problemas en el pozo.

Una limpieza insuficiente de agujero es en gran medida responsable de los atrapamientos de tubería. Si los recortes de perforación generados por la barrena no son sacados en forma efectiva del espacio anular y eliminados posteriormente del pozo, se comenzará a pegar la sarta de perforación en las paredes del pozo. Los recortes pueden acumularse en el agujero del pozo justo abajo del lastra barrenas mientras se está perforando, pero se sedimentarán alrededor del aparejo de fondo (barrena, lastra barrenas y estabilizadores) cuando se pare la circulación del fluido de perforación para la realización de una conexión. Así mismo, los recortes de perforación que no sean sacados fuera del pozo se pueden pegar a las paredes del pozo o a la tubería de perforación y empezar un empacamiento al sacar la sarta de perforación a superficie. En el caso de los atrapamientos por empacamiento o puenteo es importante circular y dejar limpio el agujero posterior a la liberación de la sarta.

En otras palabras se le llama tubería atrapada a la imposibilidad de mover la sarta de trabajo hacia arriba o hacia abajo del pozo, siendo ésta la causa más común de pérdida de tiempo en operaciones de perforación de pozos petroleros. Cuando la tubería se atrapa, el costo de liberarla para volver a trabajar o desviar el pozo por no recuperar la sarta puede exceder la cantidad presupuestada que se tenía prevista para el proyecto de perforación. Así el tiempo y el dinero perdidos son unos de los costos que se pueden evitar si se tiene un adecuado programa de hidráulica de perforación tomando en cuenta los gradientes de presión de poro y fractura.

Se investiga a diario sobre limpieza de agujero y mucho más de limpieza en pozos de alcance extendido. El número de investigaciones y artículos sobre este tema es grande, como un dato histórico el primer artículo sobre limpieza de agujero fue escrito en 1951 por William y Bruce<sup>[1]</sup>, publicaron un documento para direccionar la capacidad de arrastre de recortes de los fluidos de perforación. Este documento es referencia de muchos otros que se escribieron posteriormente sobre limpieza de agujero. En los últimos veinte años los esfuerzos de perforación de pozos

---

petroleros han estado enfocados a la perforación direccional y de alcance extendido, por ello, la optimización de la limpieza de agujero representa uno de los principales retos cuando se planea y perfora un pozo de alcance extendido.

#### **4.1. FACTORES QUE AFECTAN EN LA LIMPIEZA DE AGUJERO**

El problema principal en pozos de alcance extendido es la limpieza de agujero, debido a que existen atrapamientos de tuberías debido a esto, así también existen diferentes parámetros que obstaculizan la limpieza como se mencionan a continuación y posteriormente son descritos:

- El gasto del fluido de perforación
- Ángulo de inclinación del pozo
- Las camas (acumulaciones) de recortes de perforación dentro del agujero
- Reología del fluido y régimen de flujo
- Velocidad de perforación
- Rotación de la tubería de perforación
- Densidad del fluido

#### **GASTO DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN**

Este es el parámetro mas importante que influye en la limpieza de agujero, especialmente en pozos altamente desviados y de alcance extendido. Si el gasto no es lo suficientemente alto, se puede formar una cama de recortes fija o móvil dependiendo de las condiciones de flujo, esta cama de recortes actúa sobre la cara baja del espacio anular, el cual es un peligro potencial para los atrapamientos de tubería. Se deberán diseñar relaciones altas de flujo con la óptima velocidad de transporte y así alcanzar una buena limpieza del agujero y poder erosionar la cama de recortes si se llegara a formar.

El gasto también se tiene que manejar de manera cautelosa debido a que si se maneja demasiado gasto, podría fracturarse la formación que se esta perforando, debido a que las caídas de presión por fricción aumentarán a medida que incrementa el gasto de fluido de perforación y en consecuencia la densidad equivalente de circulación.

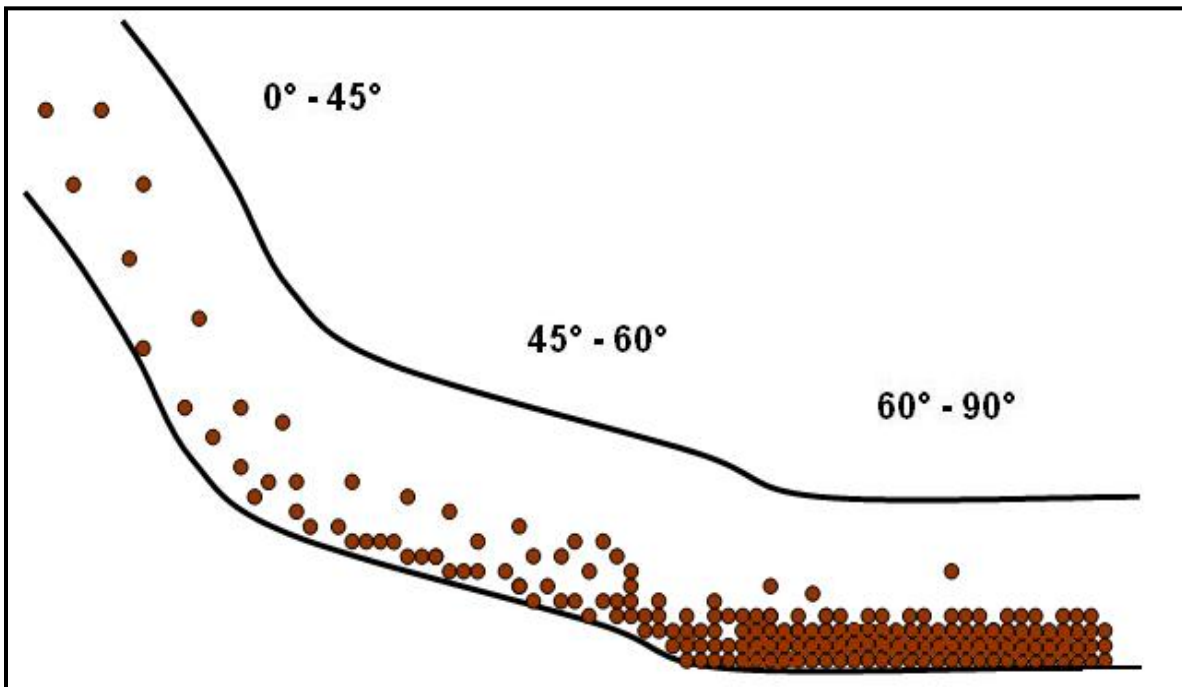


---

## ÁNGULO DE INCLINACIÓN DEL POZO

Este es el parámetro que hace más difícil el mantener un transporte adecuado de recortes. Para la suspensión de recortes, la mínima velocidad de transporte requerida se incrementa tanto como se incrementa el ángulo del agujero. Existen tres zonas o regiones de inclinación que afectan tanto a los pozos direccionales como de alcance extendido, las cuales ya han sido identificadas por Sifferman<sup>[2]</sup> y son las siguientes:

- Región Vertical de cero a 45°
- Región de Transición 45 a 60°
- Región Horizontal de 60 a 90°



**Figura 4.1.** Representación esquemática del asentamiento de los recortes de perforación dependiendo del ángulo de inclinación.

La acumulación de los recortes y mecanismos de limpieza del pozo son marcadamente distintos en cada zona. En la sección vertical, lo que reduce la velocidad de deslizamiento mejora la limpieza del pozo. Los recortes migran hacia la cara bajo del pozo a medida que el pozo empieza a desviarse de la vertical. De acuerdo a la **Figura 4.1** al aproximarse el ángulo a 45°, los recortes comienzan a permanecer más tiempo en contacto con la pared antes de ser acarreados a la superficie. A medida que el ángulo de inclinación del pozo aumenta de 45° a 60° la duración del tiempo que los recortes están sobre la pared también aumenta. En ángulos mayores a 60° las camas de recortes se deslizan y corren a la parte baja del pozo, incluso mientras se esta circulando<sup>[3]</sup>.

---

## REOLOGÍA DEL FLUIDO Y RÉGIMEN DE FLUJO

Algunos parámetros que benefician en pozos verticales pueden ser perjudiciales para pozos direccionales y de alcance extendido, como es el caso del punto de cadencia, ya que en un pozo vertical al aumentarlo resultará en mejor limpieza del agujero pero en pozos direccionales o de alcance extendido al aumentar el punto de cadencia resulta dañino, esto es por que el lodo viscoso no puede penetrar la cama de recortes tan fácilmente como lo es el lodo menos viscoso.

El efecto de la reología es la dependencia del régimen de flujo. En régimen de flujo turbulento, reducir la viscosidad del fluido es favorable para limpieza de agujeros direccionales y de alcance extendido. Sin embargo, en un régimen de flujo laminar, incrementar la viscosidad del fluido puede alcanzar mejor transporte de los recortes. Existe reología menos favorable de fluido cuando se requiere una mínima velocidad de transporte para que la limpieza de agujero sea máxima<sup>[3]</sup>.

Los efectos del régimen del flujo del fluido sobre la limpieza del agujero dependen del nivel de la viscosidad del fluido. En este caso la relativamente baja viscosidad y flujo turbulento proporcionan mejor limpieza de agujero. Sin embargo, cuando la viscosidad del fluido se incrementa sobre un cierto nivel, la alta viscosidad en régimen de flujo laminar superará la baja viscosidad del fluido en régimen turbulento.

## VELOCIDAD DE PERFORACIÓN

El ritmo de penetración o velocidad de perforación influye en el tamaño y cantidad de los recortes, sin embargo la cantidad de recortes no afecta la altura de la cama, ésta permanece estable sin importar el ritmo de penetración. La velocidad crítica que limita el crecimiento de la cama no cambia la producción de recortes, por lo tanto, la altura de la cama no cambia. Conforme mas recortes se generan, son transportados en suspensión arriba de la cama. El ritmo de penetración podría tener un efecto sobre la limpieza de agujero en ángulos bajos y secciones verticales.

Por otro lado, la alta relación de penetración y una alta velocidad de transporte se requieren para una adecuada limpieza de agujero. Esto puede ser justificado para minimizar el ritmo de perforación y mejorar la limpieza de agujero cuando se perforan con dificultad pozos de alcance extendido. En la práctica se debe evitar un repentino incremento en la velocidad de perforación. Una buena práctica es mantener un constante ritmo de penetración, el cual es derivado de un modelo adecuado de limpieza de agujero.

---

## **ROTACIÓN DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN**

La rotación axial (sobre un eje imaginario en el centro del agujero) de tubería tiene pocos efectos sobre la velocidad mínima de transporte para la limpieza de agujeros desviados. Sin embargo, si la tubería de perforación es rotada en una forma orbital, se mejoraría la limpieza de pozos desviados en el mecanismo de recortes rodados (del fondo hacia la superficie). En operaciones de campo se realizan pruebas de rotación de tubería para que sea efectivo el transporte de recortes, especialmente en pozos de alcance extendido, como resultado directo del movimiento en forma de órbita (ya que la tubería se encuentra recargada en la parte baja del pozo y al rotarla girará de forma que su eje no será el centro del agujero) y efectos de barrido sobre la tubería de perforación.

## **DENSIDAD DEL FLUIDO**

La densidad del fluido afecta directamente la fuerza efectiva gravitacional de los recortes, es la única fuerza que resiste su remoción. Cualquier incremento en la densidad del lodo decrementa la fuerza de efecto gravitacional y este incrementa la eficiencia de la limpieza de agujero. En pozos direccionales y de alcance extendido la concentración de recortes disminuye conforme aumenta la densidad del lodo, debido a la diferencia de densidades. Además, la densidad del lodo contribuye a la limpieza del agujero, en ángulos grandes ocasiona que la cama de recortes esté más fluida y menos compactada. La contribución que hace la densidad del lodo a la transferencia de momentum permanece constante a cualquier ángulo. Por otro lado, el efecto de flotación tiene un efecto decreciente al mover los recortes conforme aumenta el ángulo, ya que cuando el ángulo sea  $90^\circ$  la fuerza de gravedad será nula.

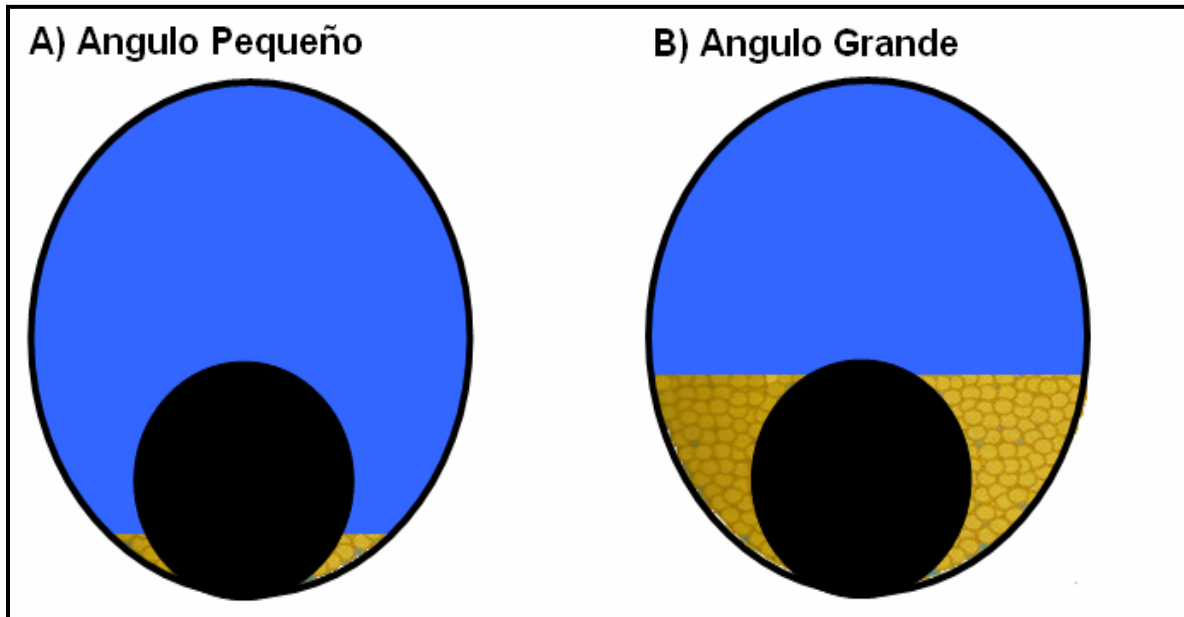
### **4.2. CAMA DE RECORTES DE PERFORACIÓN**

Se le llama cama de recortes al asentamiento de los recortes de perforación generados por la barrena en la parte baja del pozo. Si se tiene una cama de recortes la velocidad anular en algún punto es constante. Si el gasto del fluido se incrementa, la cama se erosiona, esto aumenta el área de flujo. El incremento en el área de la sección transversal causará la disminución de la velocidad anular y llevará a un estado de equilibrio.

Los recortes se asentarán en el lado inferior del pozo y formarán una cama de recortes, a menos que una velocidad anular crítica se aplique, esta velocidad será lo suficientemente alta para prevenir la depositación de los recortes. Con frecuencia es imposible alcanzar una velocidad anular suficientemente alta para prevenir totalmente la depositación de recortes en su totalidad, debido a las limitaciones de presión en las bombas y en los gradientes de fractura.

---

La cama de recortes puede variar dependiendo del ángulo, en la **Figura 4.2** se muestran dos casos, en el primero la cama de recortes es de ángulos pequeños y en el segundo es de ángulos grandes, esto debido a que el área anular es mas grande a bajos ángulos de inclinación, la velocidad anular es mas lenta para algún gasto de flujo dado.



**Figura 4.2. Cama de recortes dependiendo del ángulo.**

### **4.3. EJEMPLO DE LIMPIEZA CRÍTICA DE AGUJERO**

Un ejemplo claro es lo sucedido en el pozo Arquimia 31, donde se ve la necesidad de tomar conciencia sobre la importancia de la limpieza de agujero en futuros pozos de alcance extendido, ya que aunque este pozo no sea de alcance extendido puede servir de lección para no volver a cometer errores en este ámbito.

Al estar perforando la última etapa en el pozo Arquimia 31 del Activo Integral Veracruz, con un ángulo de  $84^\circ$ , se navegó 200 m dentro del yacimiento, existiendo un atrapamiento de tubería por mala limpieza en el agujero, donde nos vimos obligados a cementar toda la sarta y utilizar ésta como aparejo de producción, con ello los trabajos se retrasaron varios días, al final resultó un pozo productor con 31.5 mmpcd por un estrangulador de 3/4", con una presión en la cabeza del pozo de 2,258 psi.

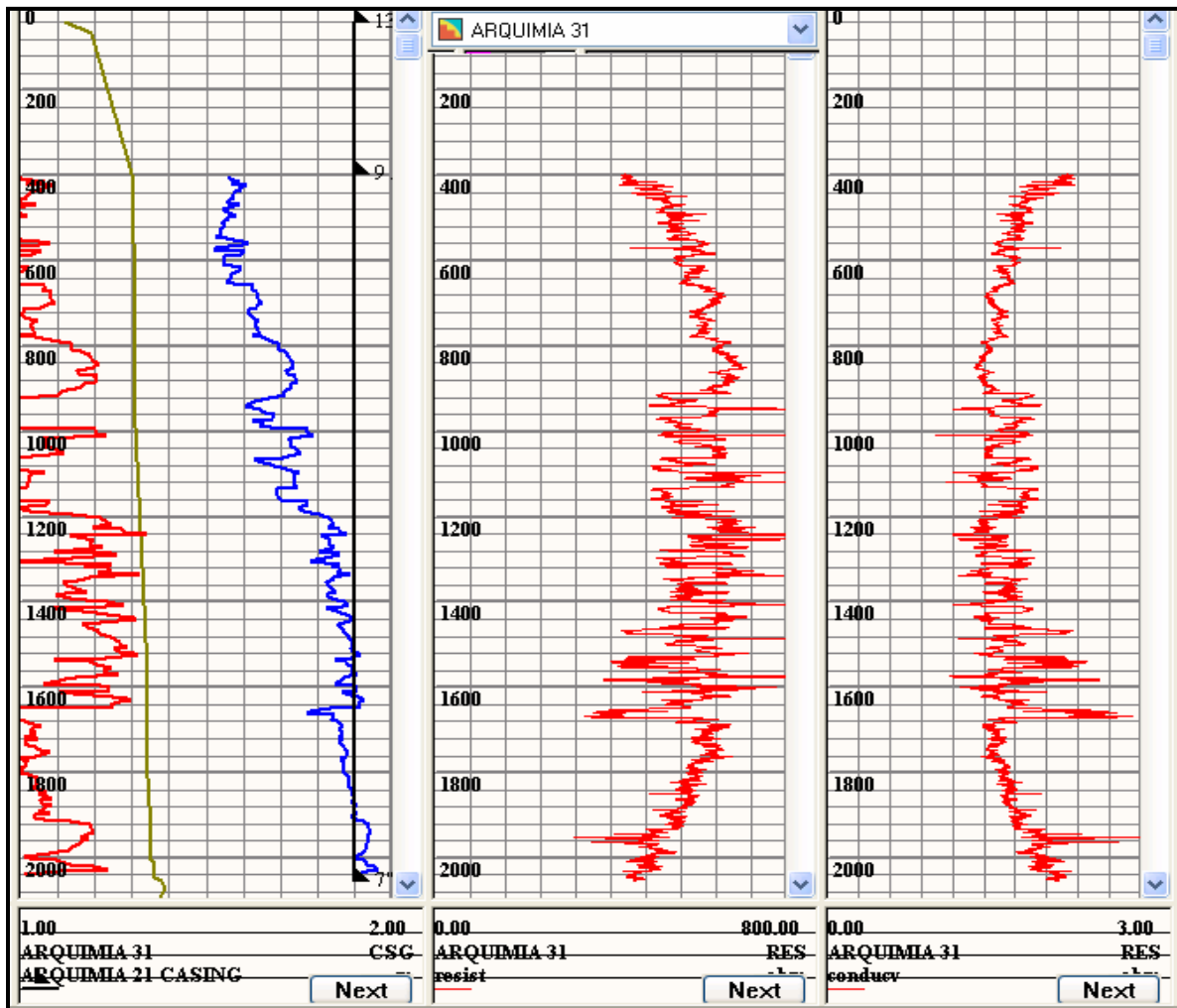
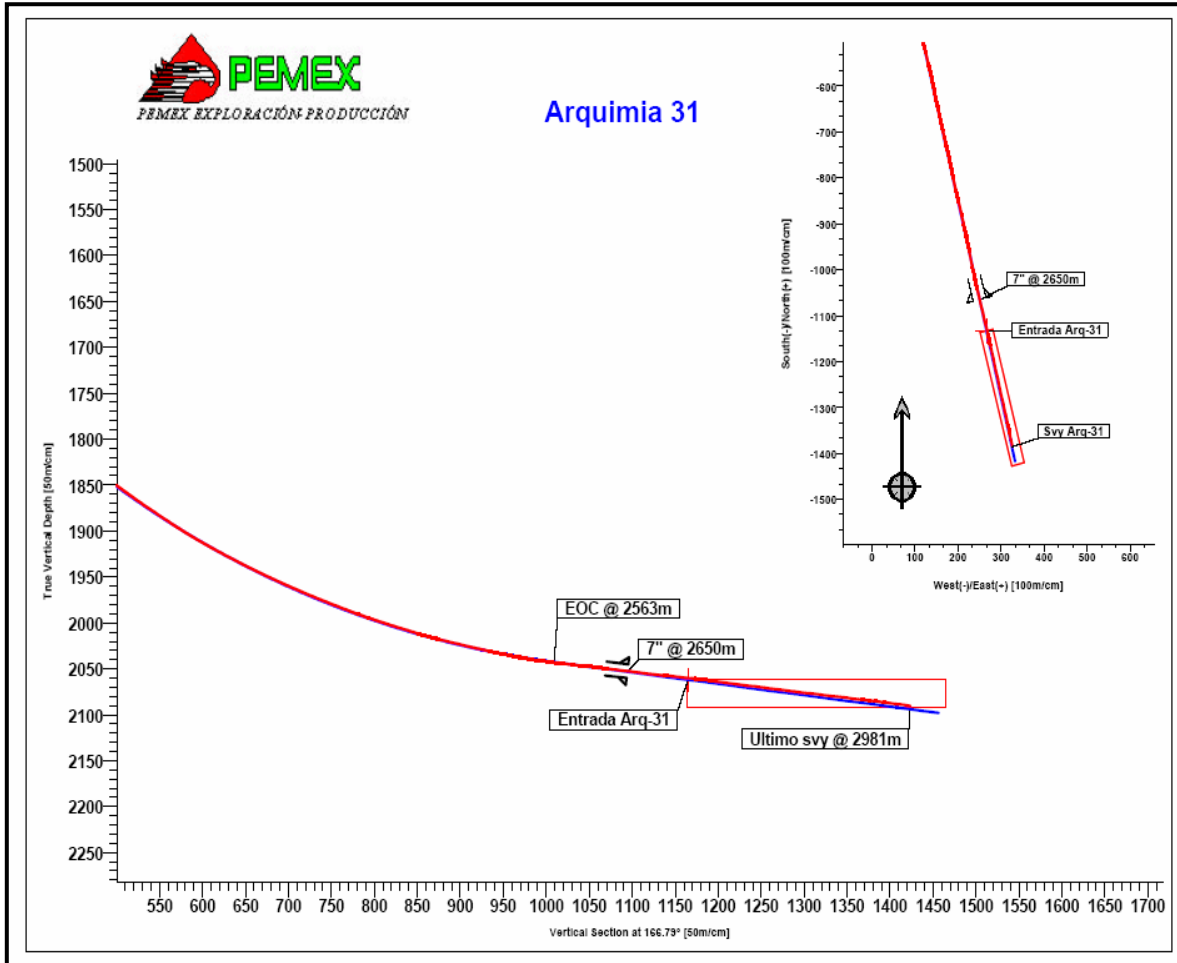


Figura 4.3. Gradientes de poro y fractura del pozo Arquimia-31.

El atropamiento se dio al perforar a 2,998 m el día 18 de Noviembre de 2004, llevando una velocidad de penetración de 22 m/hr, en los últimos 3 metros 1 minuto cada uno, se levantó la sarta a 2983 para hacer conexión, se realizó la conexión y se observó atropamiento de la sarta. Se tenía una densidad de 1.37 gr/cc con lodo de emulsión inversa. La **Figura 4.3** muestra los gradientes de poro y fractura de este pozo, el color verde indica la densidad con la que se perforó el pozo, en rojo la presión de poro y el azul el gradiente de fractura, del lado derecho se representa un esquema de las tuberías que se introdujeron, del lado izquierdo se muestra la profundidad vertical.

Este pozo fue perforado con un diseño direccional de curva tipo catenaria, alcanzando un ángulo máximo de 84°, un desplazamiento de 1,423 m, así como una profundidad vertical de 2,090 m, en la **Figura 4.4** se observa una gráfica de las desviaciones de este pozo, donde se puede ver la construcción de una curva casi perfecta, la curva real comparada con la curva programada.



**Figura 4.4. Gráfica de desviaciones del Pozo Arquimia 31.**

En este pozo se conjugaron muchos factores, dando como resultado el atropamiento de la sarta de perforación, en el transcurso de los días no se notó mejora en los trabajos que se realizaron para liberar la sarta y finalmente se decidió cementar en esas condiciones, dejando a la sarta de perforación como aparejo de producción, cementando toda la sección de agujero descubierto y dejando un traslape de cemento de 1,150 m dentro de la tubería de revestimiento de 7". Este fue el mejor acierto que tuvo la Unidad Operativa de Perforación Veracruz ya que al probar el aparejo con 5,000 psi la prueba de hermeticidad fue satisfactoria y se procedió a disparar el pozo.

Este pozo solo entra en la clasificación de pozos horizontales, pero si queremos perforar pozos de alcance extendido; debemos analizar con mayor detalle cuales fueron las fallas que generaron ese atropamiento y no volver a cometer errores, que pudieran impactar en los proyectos de perforación. Después de ese incidente en la Unidad Operativa de Perforación no volvió a ocurrir algo parecido, debido a que se puso especial atención en la limpieza del agujero.

---

## **5. MODELOS HIDRÁULICOS PARA LA LIMPIEZA DE AGUJERO**

En este capítulo se mencionan los patrones de flujo de los modelos existentes de dos y tres capas, así como la descripción de los modelos de dos capas, dos capas modificado y finalmente el modelo de tres capas. Con esto se pretende sentar las bases para el siguiente capítulo para tener un panorama mas específico de lo que representa la hidráulica de la perforación de pozos, y como a partir de las ecuaciones de balance de materia y de momentum llegamos a simular las condiciones ideales de los pozos, que repercutirán desde la planeación del proyecto hasta cuando se este perforando el pozo, y se tenga que modificar las condiciones de gasto del fluido a nuestro favor para evitar la formación de la cama de recortes y se tenga una óptima limpieza del agujero de perforación.

El uso de modelos hidráulicos es importante para la limpieza de los agujeros, ya que durante las operaciones de perforación de pozos direccionales, los recortes de perforación se depositan en la cara baja del pozo y forman una cama fija en el espacio anular, si la velocidad del fluido no es suficientemente alta para dejar limpia toda la sección del agujero, esto puede causar diversos problemas durante las operaciones de perforación y cementación como: un alto torque y alto arrastre, empacamiento del agujero, atrapamientos de tubería y dificultades para introducir la tubería de revestimiento. Sin embargo, la predicción exacta del gasto crítico requerido para remover, o prevenir la formación de la cama de recortes es crucial para la planeación y perforación de pozos de alcance extendido como los que a futuro se pretenden perforar en la Cuenca Terciaria de Veracruz, lo cual ayudará a incrementar la demanda de pozos cada vez con un mayor alcance y teniendo un sustento técnico.

### **5.1. PATRONES DE FLUJO MEZCLA LÍQUIDO-SÓLIDO DEL MODELO DE DOS CAPAS**

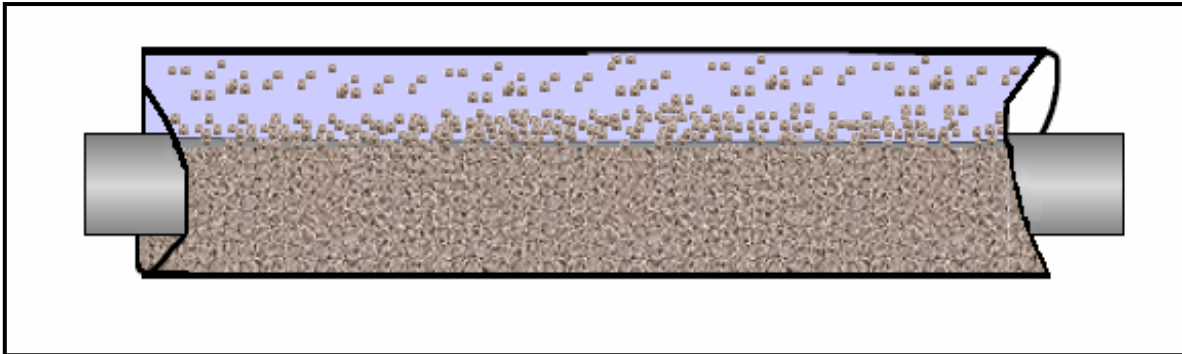
Para conocer las características del fenómeno hidráulico que se encuentra dentro del pozo, se describirán los patrones de flujo existentes en una mezcla de fluidos sólido-líquido, la importancia de estos fenómenos es debido a la tendencia de asentamiento de las partículas sólidas que se observan en pozos horizontales para detectar de una forma mas clara la cama de recortes, lo cual servirá como antecedente para el siguiente capítulo. A continuación se describen los patrones de flujo que los autores de los modelos de dos capas mencionan<sup>[1,2,3]</sup>:



---

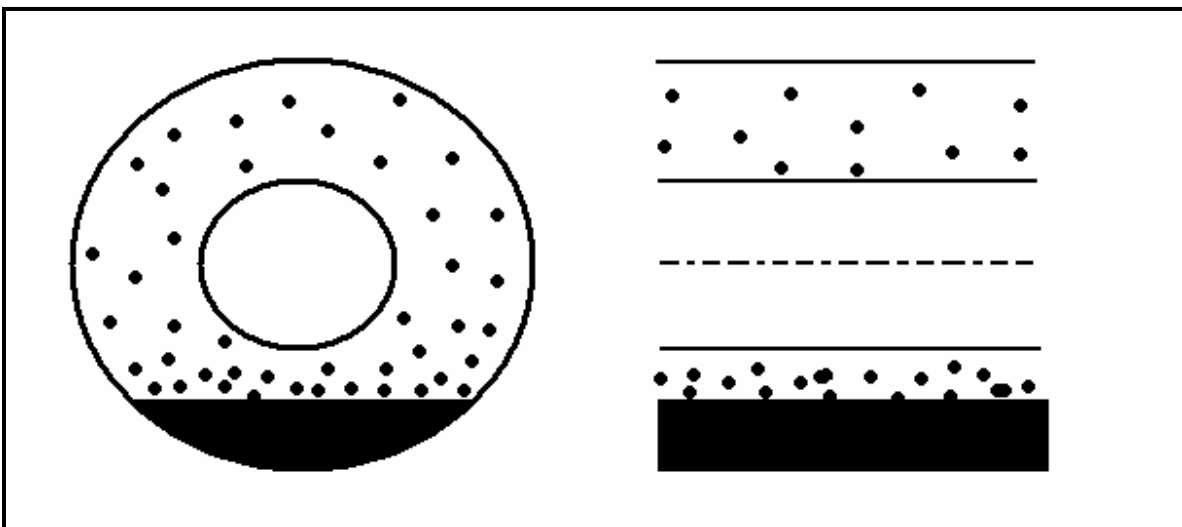
### 5.1.1. PATRÓN DE FLUJO CON CAMA FIJA

Cuando el gasto de la mezcla es bastante bajo para permitir movimiento de todas las partículas inmersas, algunas de ellas forman un depósito fijo desde el fondo del pozo. En este patrón de flujo únicamente la fuerza de arrastre de las partículas es suficientemente fuerte para arrastrar los recortes adelante y así generar una capa en forma de cama sobre la cara baja del agujero<sup>[1]</sup>, esto se puede observar en la **Figura 5.1**. Esto frecuentemente ocurre cuando la viscosidad del fluido es alta y el flujo es laminar.



**Figura 5.1.** Representación del patrón de flujo con cama fija.

En reducciones de velocidad del líquido o incrementos en el área de la sección transversal, resulta en más y más sólidos depositados<sup>[2]</sup>. Este patrón de flujo se puede observar en una sección transversal de tubería en la **Figura 5.2**.

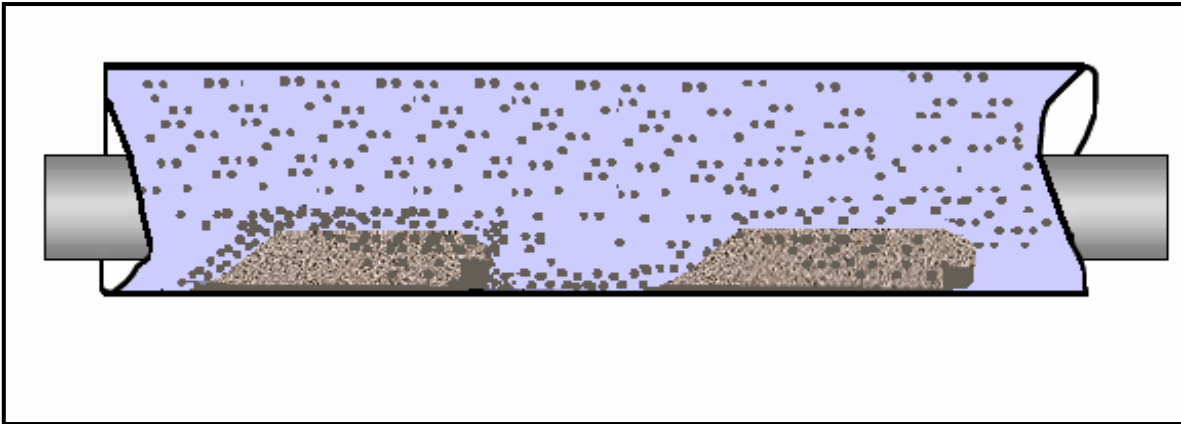


**Figura 5.2.** Sección transversal de la concentración de sólido-líquido en el flujo de cama fija.

---

### 5.1.2. PATRÓN DE FLUJO CON CAMA MÓVIL

Se da a bajos gastos donde las partículas se acumulan en la parte baja del espacio anular, formando una cama empacada o móvil de partículas. La parte superior de la sección transversal del espacio anular es ocupada por una mezcla heterogéneamente suspendida y tiene la menor concentración de recortes<sup>[3]</sup>. Esto ocurre cuando la velocidad del fluido se reduce y el ángulo de inclinación se incrementa, entonces la fuerza de elevación debe ser todavía suficiente para elevar los recortes, pero no para mantener estos en suspensión en toda la sección transversal. En un tiempo medio, la componente de la fuerza gravitacional contra la fuerza de arrastre se reduce y así la fuerza de arrastre es suficientemente fuerte para arrastrar los recortes adelante. Por lo tanto, este patrón de flujo es el resultado de la acción combinada tanto de la fuerza de elevación como de la fuerza de arrastre. Esto frecuentemente ocurre cuando la viscosidad del fluido es baja y el flujo es turbulento. Este patrón de flujo se puede observar en una sección de tubería en la **Figura 5.3**.



**Figura 5.3. Representación del patrón de flujo de cama móvil.**

En los casos donde se reduzca el gasto de fluido resulta la depositación de partículas sólidas en el fondo del pozo. Los sólidos comienzan a formar la cama que es movida en la dirección del flujo, mientras algunos sólidos en la capa superior están uniformemente distribuidos. La velocidad a la cual esta sucediendo esta formación de cama tiene diferentes nombres como: velocidad límite de depósito, velocidad de suspensión o velocidad crítica<sup>[2]</sup>. Este patrón de flujo se puede observar en una sección de tubería en la **Figura 5.4**.

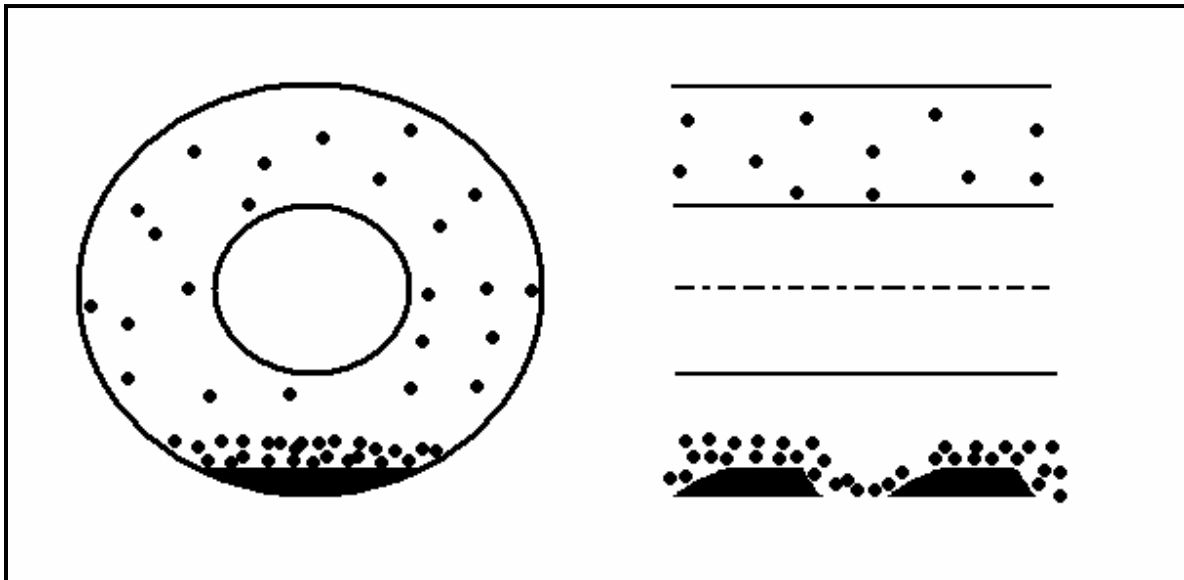


Figura 5.4. Sección transversal de la concentración de sólido-líquido en el flujo de cama móvil.

### 5.1.3. PATRÓN DE FLUJO COMPLETAMENTE SUSPENDIDO

Este flujo se encuentra a alto gasto adquiriendo una alta mezcla del fluido con todas las partículas sólidas que son suspendidas y acarreadas por el líquido. Este patrón se encuentra en suspensión heterogénea, aquí la fuerza de elevación es lo suficientemente fuerte para superar el componente de la fuerza gravitacional en la dirección normal al flujo, para que los recortes puedan ser elevados lejos de la pared del pozo y mantenerlos en suspensión. Sin embargo, existe un gradiente de concentración de recortes a través del espacio anular con más recortes de la mitad hacia abajo. Este patrón ocurre normalmente a altas velocidades del fluido, las cuales producen una fuerte fuerza de elevación, y/o a bajos ángulos donde la componente de la fuerza gravitacional es pequeña comparada con la fuerza de elevación<sup>[3]</sup>.

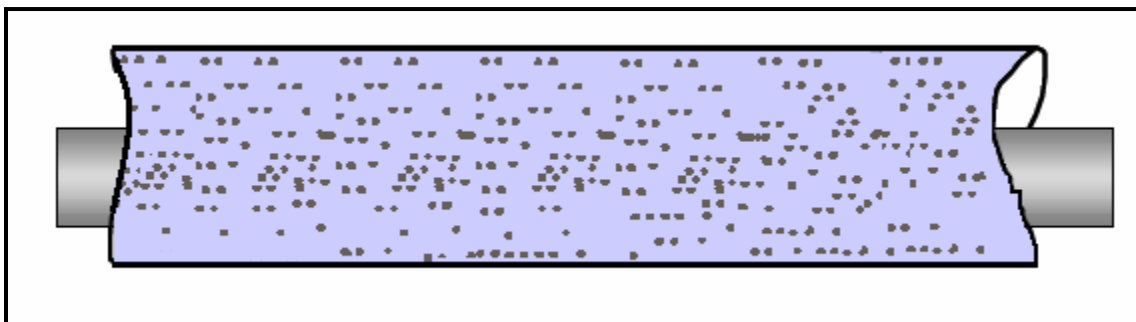
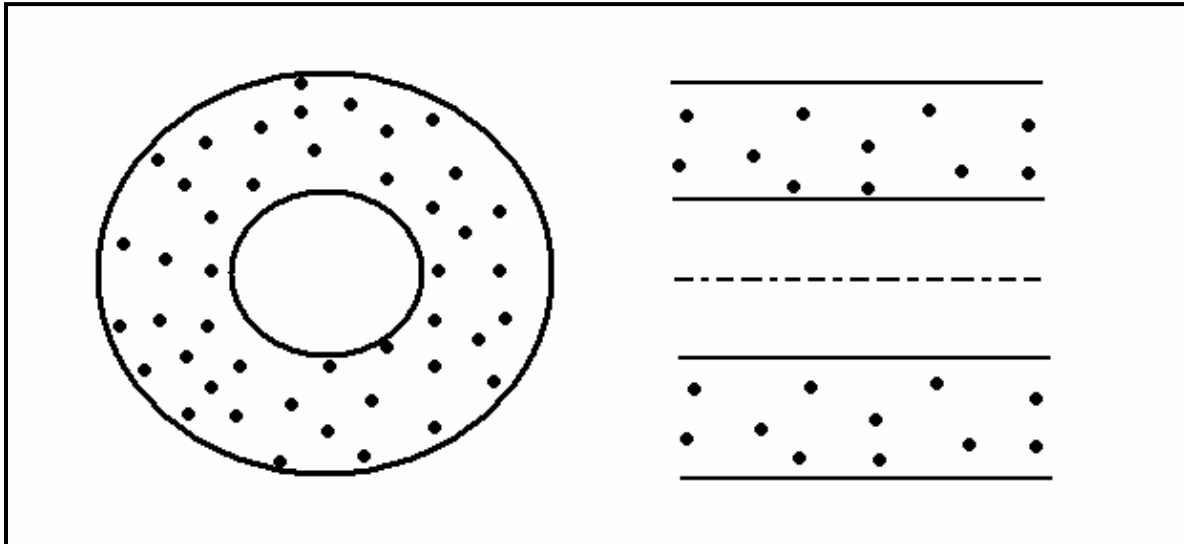


Figura 5.5. Representación del patrón de flujo completamente suspendido.

Dentro del patrón de flujo completamente suspendido existen dos modalidades, flujo suspendido simétrico y flujo suspendido asimétrico. El simétrico ocurre cuando una alta velocidad del sólido puede ser uniformemente distribuida en el líquido y normalmente esta suposición es hecha debido a que no existe resbalamiento entre las dos fases, es decir la velocidad del sólido es igual a la velocidad del líquido. Este patrón de flujo se observa con sólidos bastante finos, menos que 1mm de diámetro. Este flujo normalmente no ocurre en operaciones de perforación de pozos petroleros ya que el diámetro de los recortes o sólidos es  $> 1\text{mm}^{[2]}$ . La concentración de sólidos se observa en la **Figura 5.6.a**.



**Figura 5.6.a. Sección transversal de la concentración de sólido-líquido en el flujo completamente suspendido simétrico.**

Como existe una pequeña variación en el gasto que proporciona la bomba de fluidos también existe una tendencia para que los sólidos fluyan cerca del fondo del espacio anular, pero todavía suspendidos, así crea una concentración de sólidos asimétrica (no homogénea), pero los sólidos todavía se mueven con el líquido. Se puede observar este fenómeno en la **Figura 5.6.b**.

La velocidad de la mezcla se encuentra en un flujo en transición con una cama fija y con una cama superior moviéndose y es llamada "Velocidad límite de depósito"<sup>[3]</sup>. Es importante saber de esta velocidad, para evitar la formación de depósitos en el espacio anular. La dependencia del gradiente de presión sobre el gasto es afectado por la existencia de los diversos patrones de flujo. Para un alto gasto la caída de presión de la mezcla sólido-líquido es mayor que el mismo gasto llevando únicamente líquido. Si el gasto se incrementa la caída de presión incrementa, por ello a mayor concentración de sólidos mayor caídas de presión. Se debe controlar el contenido de sólidos para no rebasar el gradiente de fractura manteniendo el mismo gasto.

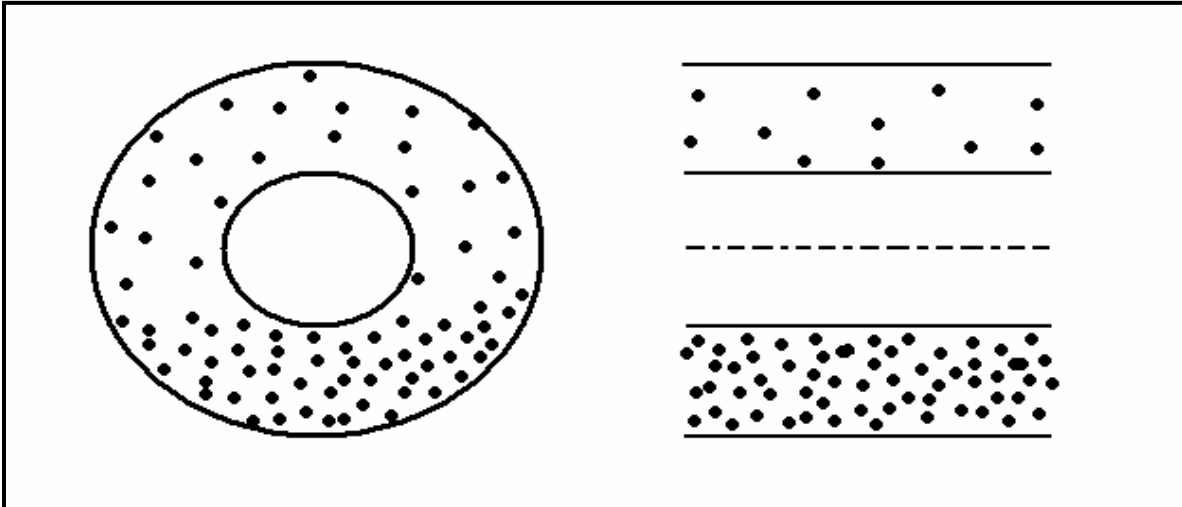


Figura 5.6.b. Sección transversal de la concentración de sólido-líquido en el flujo completamente suspendido asimétrico.

## 5.2. MODELO DE DOS CAPAS

En el modelo de dos capas (capa moviéndose & líquido moviéndose en el claro anular en flujo laminar) propuesto por Gavignet & Sobey (1989) realizaron un avance básico pero los datos no se adaptaron a las predicciones del modelo. El modelo fue ampliado por Martin & Santana (1990), mencionado por Martin et al. (1999) para referirse a la distribución de sólidos (suspendidos) en la capa líquida y cubriendo los tres patrones de flujo. Como resultado se obtuvieron cuatro ecuaciones algebraicas y una ecuación integral para la difusión de turbulencia de los sólidos. Indican que era insignificante el efecto de sólidos en la capa líquida que permitiría al líquido moverse en la cama sólida<sup>[2]</sup>.

El modelo de dos capas de Martin & Santana (1992) y walton (1995), es el siguiente; existe una capa de líquido sobre la parte superior del espacio anular conteniendo sólidos distribuidos (suspendidos) y una capa de sólidos sobre la parte baja del espacio anular la cual puede ser movida, no obstante a una muy baja velocidad<sup>[3]</sup>.

### Balance de masa para los sólidos

$$U_S A_S C_S + U_B A_B C_B = U_M A_M C_M \quad (5.1)$$

### Balance de masa para el líquido

$$U_S A_S (1 - C_S) + U_B A_B (1 - C_B) = U_M A_M (1 - C_M) \quad (5.2)$$

---

Donde:

$U_S$  Velocidad media de suspensión

$U_B$  Velocidad media de la cama, tomada como muy pequeña, es decir  $\rightarrow 0$

$U_M$  Velocidad total de la mezcla

$C_S$  Concentración media de sólidos en la capa suspendida

$C_B$  Concentración media de sólidos en la cama

$C_M$  Concentración media mezcla

$A_S$  Área de sección transversal ocupada por la capa en suspensión

$A_B$  Área de sección transversal ocupada por la cama

$A_M$  Área total de la sección transversal, área del espacio anular.

La ecuación de momento para cada una de las dos capas es:

$$A_S \frac{\Delta P}{\Delta z} = -\tau_s S_s - \tau_i S_i \quad (5.3)$$

$$A_B \frac{\Delta P}{\Delta z} = -F_B - \tau_B S_B + \tau_i S_i \quad (5.4)$$

Donde:

$\frac{\Delta P}{\Delta z}$  Caída de presión

$\tau_s$  Esfuerzo cortante interfacial del fluido hacia la pared

$\tau_B$  Esfuerzo cortante interfacial de la cama hacia la pared

$\tau_i$  Esfuerzo cortante interfacial del fluido hacia la cama

$S_s$  Perímetro interfacial del fluido hacia la pared

$S_B$  Perímetro interfacial de la cama hacia la pared

$S_i$  Perímetro interfacial del fluido hacia la cama

$F_B$  Fuerza de contacto de la cama hacia la pared

El esfuerzo de corte puede ser calculado por:

$$\tau_K = \frac{1}{2} f_K \rho_K U_K^2$$

Esta ecuación es comúnmente para la suspensión y la cama. Para el esfuerzo de corte de suspensión hacia la pared el índice  $K$  se convierte en  $S$ , entonces la  $\rho_s$  es la densidad de la suspensión,  $U_s$  es la velocidad promedio superior y  $f_s$  es el factor de fricción de la cama hacia la pared.

El esfuerzo de corte interfacial es calculado usando la diferencia de las ecuaciones de las velocidades de cada capa.

$$\tau_i = \frac{1}{2} f_i \rho_s (U_s^2 - U_B^2)$$

Para el esfuerzo cortante de la cama se tiene:

$$\tau_B = \frac{1}{2} f_B \rho_B U_B^2$$

La fuerza de fricción estática aparece en la ecuación **(5.4)** originando el contacto entre la cama de recortes y la pared del agujero (Doran et al.<sup>[4]</sup>), y es dependiente sobre el coeficiente de interacción entre el material implicado. Su valor máximo, cuando la cama esta en movimiento inminente (próximo a iniciar el movimiento), es proporcional a la fuerza normal impuesta sobre las paredes por la cama de recortes:

$$F_{Max} = \eta \overline{F_N}$$

Donde  $F_{Max}$  es la máxima fuerza friccional y  $\overline{F_N}$  es la fuerza normal y la constante de proporcionalidad  $\eta$  es llamada el coeficiente de arrastre.

$$F_{Max} = \eta \left[ (\rho_p - \rho_f) g C_B \text{Sen} \theta A_B + \frac{\tau_i S_i}{\text{Tang} \phi} \right] \quad (5.5)$$

El primer término de la ecuación **(5.5)** representa el peso sumergido de la cama y el segundo término representa el esfuerzo Bagnold (Bagnold, 1954,1957), donde Bagnold mostró que cuando un fluido fluye sobre un depósito de cama sólida, existe un esfuerzo normal a la interfase asociada con el esfuerzo cortante ejercido por el fluido sobre el sólido

Donde:

$\rho_p$  Densidad de la partícula sólida

$\rho_f$  Densidad del fluido

$\phi$  Coeficiente de fricción interna entre las partículas y las paredes

$\eta$  Coeficiente de fricción seca

Para predecir la concentración de sólidos de la capa superior, un método de difusión turbulenta es propuesto detalladamente en Martins & Santana, el cual resulta en la siguiente ecuación [2.5].

$$C_S = \frac{C_B}{2A_s} \int_{\theta_b}^{\frac{\pi}{2}} e^{\left( \frac{-wD_\varepsilon}{2\varepsilon} (\text{Sen}\theta - \text{Sen}\theta_b) \text{Sen}\theta \right)} \text{Coseno}^2 \theta d\theta \quad (5.6)$$

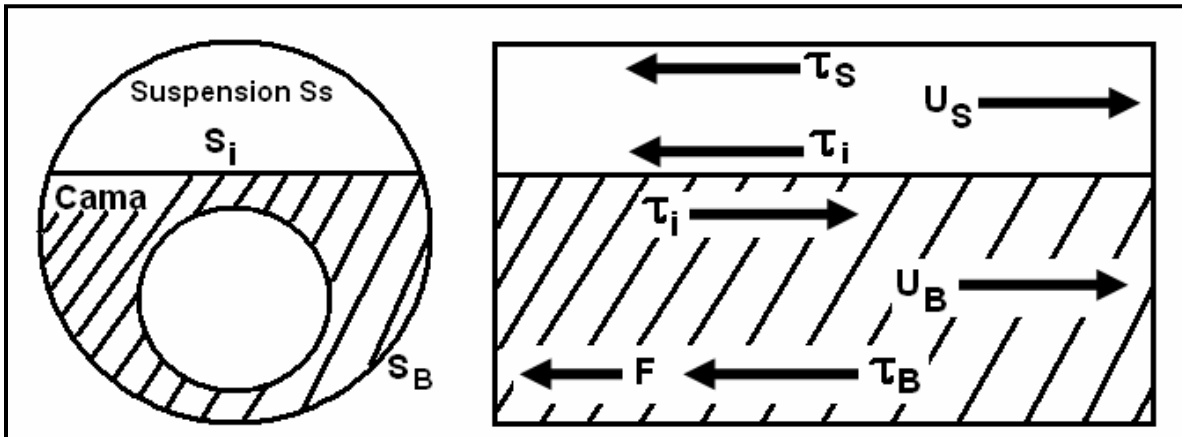
Donde:

$\varepsilon$  Coeficiente de difusión local

$w$  Velocidad Terminal local de asentamiento de la partícula

$C_B$  Concentración de la capa Inferior

$A_s, \theta_B$  y  $D$  Parámetros geométricos, ver **Figura 5.7**.



**Figura 5.7.** Diagrama del modelo de dos capas.

Para la solución de este modelo se requiere resolviendo el conjunto de cinco ecuaciones las cuales incluyen dos ecuaciones de continuidad (ecuaciones (5.1) y (5.2)), una para cada fase y dos ecuaciones de momentum (ecuaciones (5.3) y (5.4)), así también se tendrá que resolver la ecuación (5.6).



---

### 5.2.1. PREDICCIÓN DEL FACTOR DE FRICCIÓN INTERFACIAL

Uno de los aspectos importantes en la perforación de pozos con alto ángulo y de alcance extendido es el retiro de recortes que tienden a depositarse sobre la parte baja de la sección horizontal del espacio anular. Un flujo complejo fluido sólido-líquido toma lugar durante este retiro, en el cual se utilizan fluidos no Newtonianos, requiriendo información acerca de las interacciones de los diferentes materiales involucrados, fluido, recortes de la roca, formación de la roca y tuberías. Estas propiedades son necesarias para entrar a modelos mecánicos, desarrollados para caracterizar el problema. Frecuentemente ocurre que debido a la carencia de datos experimentales, los investigadores utilizan información de la industria minera. Esta práctica, naturalmente es cuestionable debido a que estos flujos son diferentes a los flujos de recortes de perforación y fluidos no Newtoniano en espacios anulares excéntricos<sup>[5]</sup>.

Los factores de fricción, referidos por Walton (1995), pueden expresarse en un camino estándar, pero no indican si se refieren a fluidos Newtonianos o no Newtonianos, suponer newtonianos. Doran et al. (1987) usan la relación para fluidos newtonianos<sup>[3]</sup>.

$$f_s = \frac{0.046}{\text{Re}_s^{0.2}}$$

$$\text{Re}_s = \frac{\rho_s U_s D_{hs}}{\mu_s}$$

**Para flujo turbulento**

$$f_B = \frac{16}{\text{Re}_B}$$

$$\text{Re}_B = \frac{\rho_B U_B D_{hB}}{\mu_B}$$

**Para flujo laminar**

Donde:

$\mu_B = \mu_s = \mu$  Viscosidad del líquido

$\rho_s = \rho_p C_s + \rho(1 - C_s)$

$\rho_B = \rho_p C_B + \rho(1 - C_B)$

$D_{hs}$  Diámetro hidráulico de la suspensión

$D_{hB}$  Diámetro hidráulico de la cama

---

Martins & Santana (1992) también usaron el concepto de factor de fricción Fanning y respetaron el trabajo de Silva & Martins (1988) quienes estudiaron experimentalmente las correlaciones para el flujo en el espacio anular de fluidos de perforación y para flujo turbulento, utilizaron<sup>[2]</sup>:

$$f_s = 0.00454 + 0.645 \text{Re}^{-0.7}$$

$$\text{Re} = \frac{8\rho U_s^{2-n} D_h^n}{K \left[ \frac{2(3n+1)}{n} \right]^n}$$

Donde

$D_h$  Diámetro hidráulico

K, n Se calculan de las lecturas del viscosímetro Fann

Para el factor interfacial  $f_i$ , la mayoría de los investigadores utilizan la expresión propuesta por Televantos et al. (1979)<sup>[2]</sup>.

$$\frac{1}{\sqrt{2f_i}} = -0.86 \ln \left[ \frac{d_p / D_h}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re}_s \sqrt{2f_i}} \right]$$

Donde

$d_p$  Diámetro del recorte de perforación

La rugosidad absoluta de la interfase debería ser representada por el diámetro de la partícula, para esto los autores encontraron que para la colisión de la partícula con la cama y para ascenso y depositación de las partículas, la cual tiende a incrementar  $f_i$ , por ello se usa el factor  $(2f_i)$ . La ecuación  $\frac{1}{\sqrt{2f_i}}$  es la Fórmula

de Colebrook para fluidos newtonianos fluyendo en tuberías rugosas. Martins et al, basaron su experimento sobre resultados obtenidos de una prueba piloto a escala utilizando un circuito de flujo, propusieron la siguiente expresión para calcular el factor de fricción<sup>[2,5]</sup>:

$$f_i = 0.966368 \text{Re}^{-1.07116} (n)^{2.360211} (d_p / D_h)^{-2.34539}$$

Santana & Martin aplicaron las metodologías de Televantos y de Martins en la predicción de la altura de la cama de recortes durante la perforación de la sección de 12 ¼", con 60° de inclinación, los resultados se muestran en la **Figura 5.8**. Así también, realizaron los cálculos para la sección de 8 ½" con la misma inclinación de 60°, estos resultados se muestran en la **Figura 5.9**. Los resultados indican que la introducción de una correlación específica para el factor de fricción interfacial impacta dramáticamente en la predicción de la limpieza de agujero.

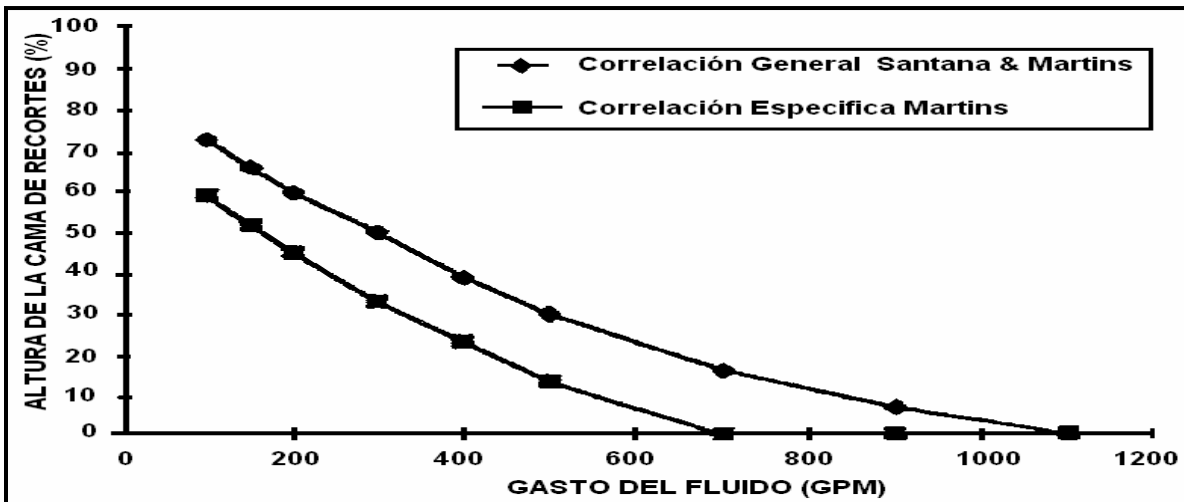


Figura 5.8. Efectos del factor de fricción interfacial en una sección de 12 ¼" con una inclinación de 60°.

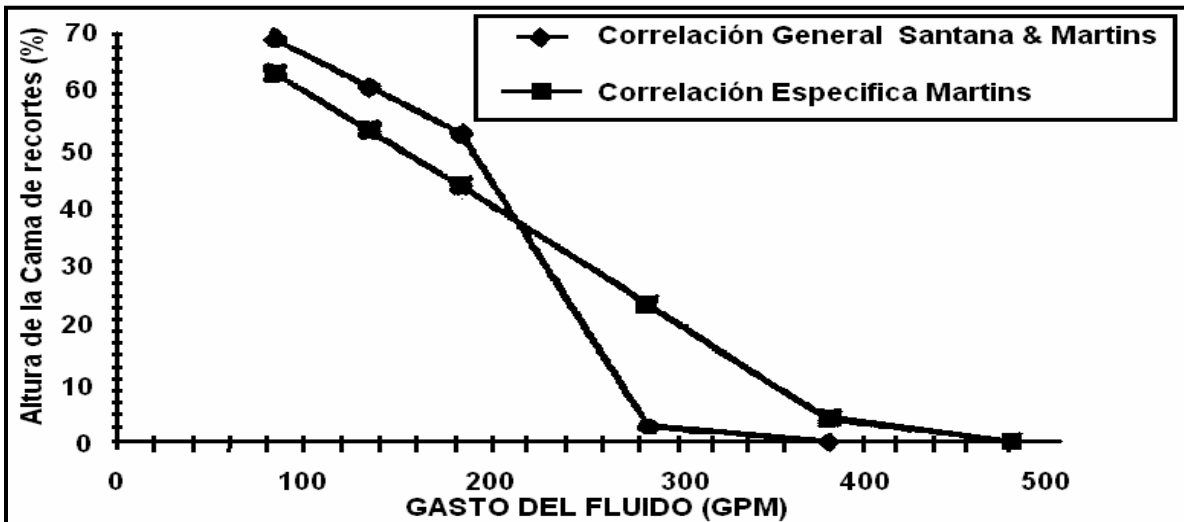


Figura 5.9. Efectos del factor de fricción interfacial en una sección de 8 1/2" con una inclinación de 60°.

## 5.2.2. IMPACTO DE LA REOLOGÍA

Se identificaron limitaciones con simuladores usados por las operadoras de perforación en el uso del modelo reológico ley de potencias para predecir el esfuerzo cortante. Diversos factores<sup>[5]</sup> enfatizaron la importancia del uso de los parámetros de modelos reológicos para cálculos hidráulicos y de transporte de recortes, basados sobre correlaciones empíricas para cálculos de factor de fricción Fanning validados en un circuito de flujo (Silva & Martins), investigaron el efecto de la selección del modelo reológico en la predicción de limpieza del agujero. Se consideraron cinco diferentes modelos reológicos: Bingham, ley de potencias, Casson, Herschell-Bulkley y Robertson Staff.

La **Tabla 5.1** muestra la ecuación de estado para cada modelo. La **Tabla 5.2** muestra la predicción del gasto crítico para la suspensión total de la cama de recortes, usando los cinco diferentes modelos reológicos. Los resultados indicaron que la selección del modelo reológico tiene gran influencia sobre las predicciones de la limpieza de agujero. Basados sobre diversas simulaciones de casos típicos de campo, los modelos Bingham y Casson son inexactos, especialmente para predicción de la velocidad de sedimentación. Probablemente la razón de este hecho sean los valores poco realistas del esfuerzo de cedencia proporcionado por estos modelos.

**Tabla 5.1. Ecuaciones constitutivas de los modelos reológicos.**

| Bingham                        | Ley de Potencias   | Casson                                      | Herschell-Bukley            | Robertson-stiff          |
|--------------------------------|--------------------|---|-----------------------------|--------------------------|
| $\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma$ | $\tau = K\gamma^n$ | $\tau = \sqrt{\tau_0^2 + [\mu_p \gamma]^2}$ | $\tau = \tau_0 + K\gamma^n$ | $\tau = A(\gamma + C)^B$ |

**Tabla 5.2. Influencia de los modelos reológicos en la predicción del gasto crítico del fluido.**

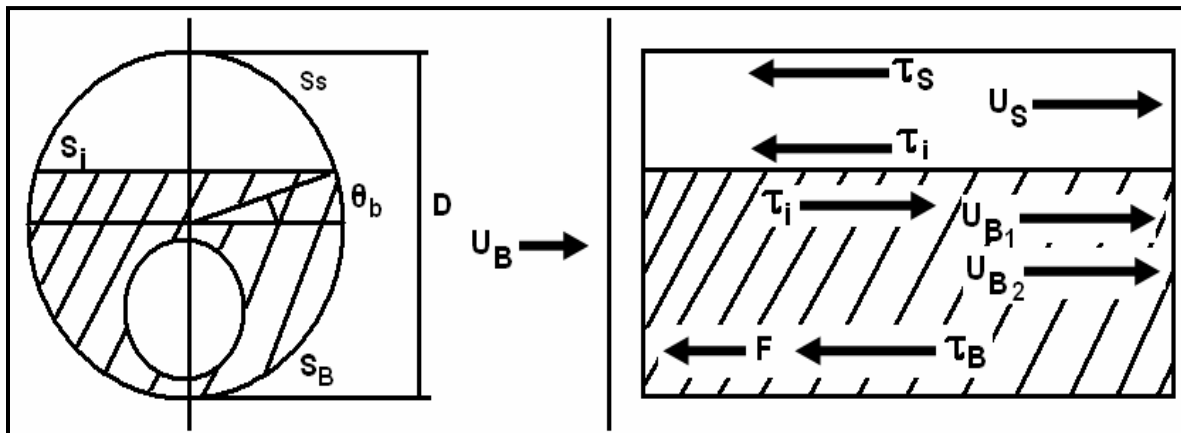
| Geometría     | Bingham GPM | Ley de Potencias | Casson GPM | Herschell-Bukley GPM | Robertson-stiff GPM |
|---------------|-------------|------------------|------------|----------------------|---------------------|
| 12 ¼" a 90°   | 610         | 670              | 810        | 920                  | 960                 |
| 8 ½" a 60°    | 620         | 560              | 450        | 420                  | 380                 |
| 8 ½" a 90°    | 710         | 630              | 550        | 510                  | 450                 |
| 8 ½" vertical | 220         | 60               | 370        | 280                  | 230                 |

## 5.3. MODELO DE DOS CAPAS MODIFICADO

Una de las suposiciones mas fuertes en este modelo propuesto por Martins & Santana es que no existe resbalamiento entre las dos fases (sólido-líquido) en una capa, por esta razón, en la formulación anterior (previamente mencionada) los autores únicamente se refieren a la velocidad de la cama y de la suspensión. Esta suposición se ve razonable para la capa suspendida donde, a diferencia de las aplicaciones de flujo en tuberías hidráulicas (trasporte de agua), la concentración

de sólidos es un poco baja y el movimiento es gobernado generalmente por la turbulencia, o al menos, el régimen de flujo transitorio. Sin embargo, en la capa de la cama, el movimiento de los sólidos es impedido por la elevada fricción de la pared y las fuerzas interfaciales [5].

El modelo propuesto por M. Santana & A. Sales es una adaptación de la idea de Doron et al, originalmente desarrollado para flujo en tuberías, ver **Figura 5.10**. La principal diferencia es que ahora, en lugar de la velocidad de la cama, el modelo contará para la velocidad de sólidos en la cama y la velocidad del líquido en la cama. Consecuentemente, todos los términos dependientes sobre la cama se modifican.



**Figura 5.10. Modelo de dos capas modificado.**

Para esta modelo las ecuaciones de conservación de masa son escritas de la siguiente forma:

**Balance de masa para los sólidos**

$$U_S A_S C_S + U_{B1} A_B C_B = U_M A_M C_M \tag{5.11}$$

**Balance de masa para el líquido**

$$U_S A_S (1 - C_S) + U_{B2} A_B (1 - C_B) = U_M A_M (1 - C_M) \tag{5.12}$$

El subíndice B1 significa que la velocidad media del sólido en la cama y el B2 indica que la velocidad media del líquido en la cama.

---

Para el esfuerzo cortante se tiene:

$$\tau_s = \frac{1}{2} f_s \rho_s U_s^2$$

$$\tau_L = \frac{1}{2} f_B \rho_B U_{B1}^2$$

Esta ecuación considera que a gastos altos de fluido existe también una fuerza de inercia actuando debido a la aceleración convectiva (la aceleración convectiva es la consecuencia de un régimen de flujo no uniforme) de las partículas de fluido pasando a través de los espacios porosos.

$$\tau_i = \frac{1}{2} f_i \rho_s (U_s - U_{B1})^2$$

La caída de presión para medios porosos es representada por la ecuación de Darcy:

$$-\frac{dP}{dZ} = B_1 u + B_2 u^2 \quad (5.13)$$

En este caso  $u$  es una velocidad relativa en la cama, así:

$$u = (1 - C_B)(U_{B1} - U_{B2}) \quad (5.14)$$

Las constantes  $B_1$  y  $B_2$  son la relación de Blake-Koseny

$$B_1 = \frac{150 \mu C_B^2}{d_p^2 (1 - C_B)^3}$$

$$B_2 = \frac{1.75 \rho_f C_B}{d_p (1 - C_B)^3}$$

Donde  $\mu$  es la viscosidad del fluido y  $d_p$  es el diámetro del recorte.

Para la solución de este modelo se requiere resolver el conjunto de cinco ecuaciones las cuales incluyen dos ecuaciones de continuidad (ecuaciones (5.11) y (5.12)), una para cada fase, una ecuación de momentum (ecuación (5.13)) y la ecuación (5.14).

#### 5.4. PATRONES DE FLUJO MEZCLA LÍQUIDO-SÓLIDO DEL MODELO DE TRES CAPAS

Para conceptualizar el proceso de transporte en el modelo de tres capas y comprender de forma más clara se mostraran los patrones de flujo, los cuales son diferentes a los patrones de flujo mezcla líquido-sólido del modelo de dos capas mencionados en el punto 5.1 de este mismo capítulo. En la Figura 5.11 se observa que a medida que se incrementa la velocidad del fluido el patrón de flujo cambia, desde una cama de sólidos sin movimiento hasta flujo completamente suspendido.

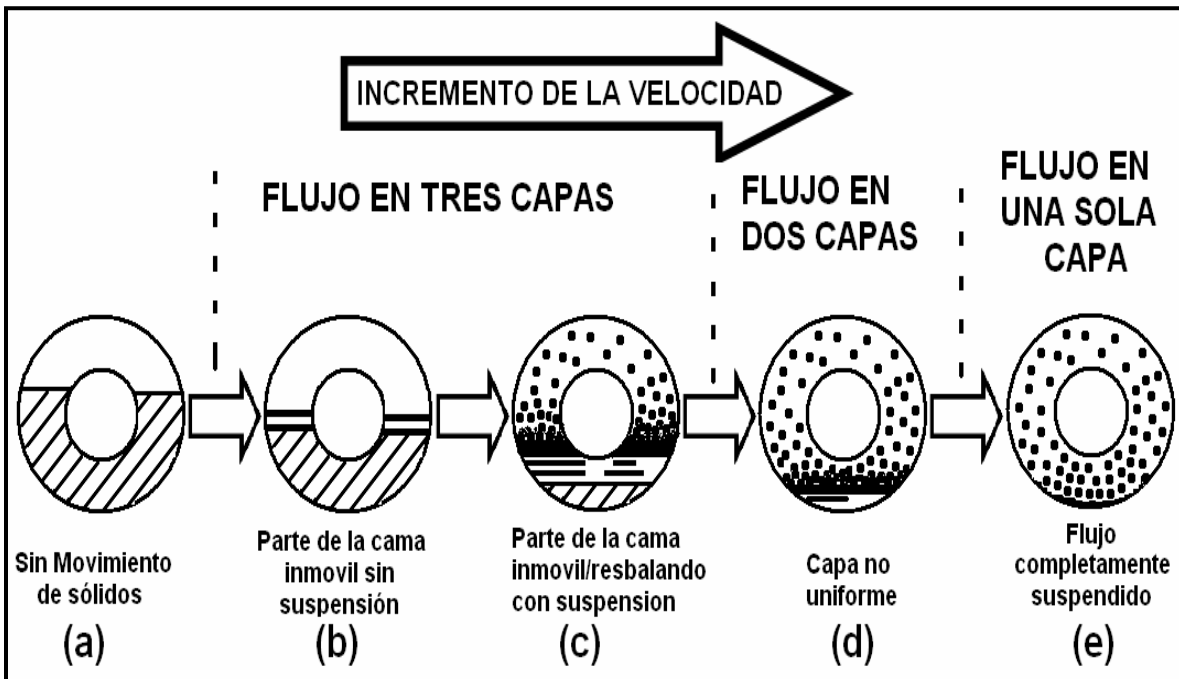


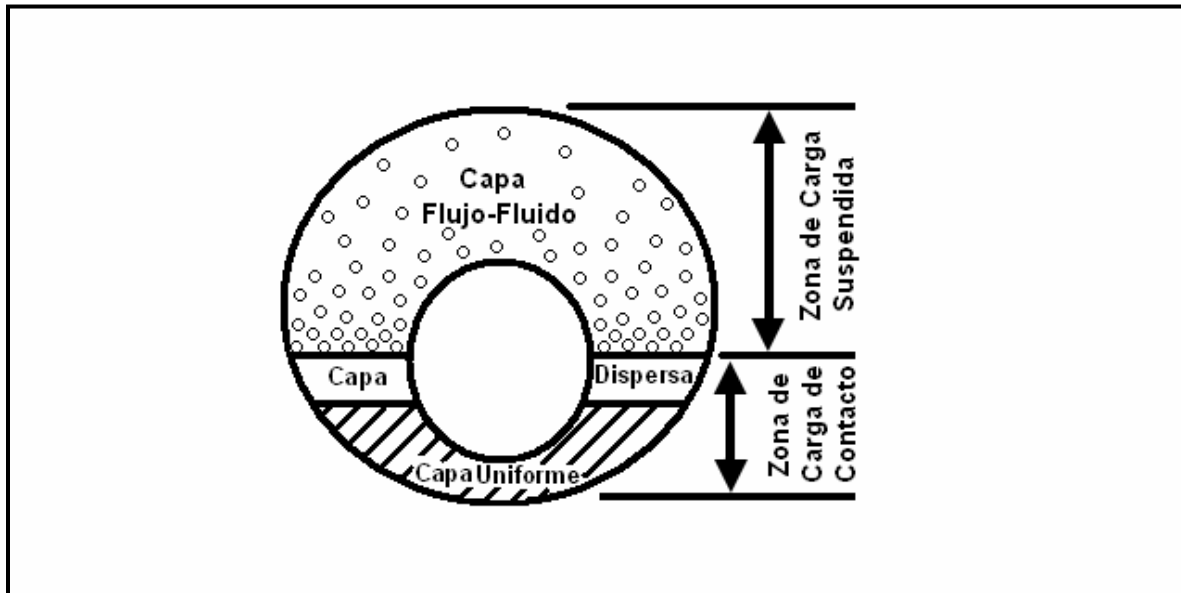
Figura 5.11. Representación esquemática de los diferentes modos de transporte.

##### 5.4.1. PATRÓN DE FLUJO DE LA ETAPA DE FLUJO EN TRES CAPAS

Para una velocidad de flujo baja, las partículas móviles tienden a asentarse formando una cama de recortes con un área de sección transversal mayor que la fase líquida. Posteriormente al incrementar la velocidad el líquido tiende a deslizarse sobre la cima de la cama inmóvil formando una "capa dispersa". Así se tiene un patrón de flujo de tres capas, de las cuales la capa 1 o inferior será una cama inmóvil de concentración de partículas uniformes, la capa 2 o media será

una capa dispersa en la cual la concentración de partículas es variada y la capa 3 o superior será una región de flujo-fluido esencialmente homogéneo sobre la cima de la sección transversal del espacio anular (como se muestra en la **Figura 5.11.(a),(b)**)<sup>[6]</sup>.

Si se continua incrementando la velocidad del flujo, la fuerza de intensidad de turbulencia de los remolinos crecerá y eventualmente alcanzará una etapa en la cual estos remolinos de turbulencia serán lo suficientemente fuertes para remover las partículas de la fase dispersa para elevarlas a la región flujo-fluido y formar con los recortes y el fluido una suspensión turbulenta. Para esta etapa, se tiene un patrón de flujo de tres capas pero con una leve diferencia en la composición (ver **Figura 5.11.(c)**): una capa suspendida heterogéneamente (también mostrada como zona de “capa suspendida” en la **Figura 5.12**) sobre la cima de la capa dispersa y una cama de concentración uniforme la cual puede ser fija o tener movimiento “en bloque” (la capa dispersa y de concentración uniforme son algunas veces referidas como una zona de carga de contacto<sup>[6]</sup>, **Figura 5.12**.



**Figura 5.12.** Representación esquemática de la sección transversal del modelo de tres capas.

#### 5.4.2. PATRÓN DE FLUJO DE LA ETAPA DE FLUJO EN DOS CAPAS

En caso de que la velocidad de flujo se incrementé, más y más partículas serán levantadas por el remolino turbulento, la cama se volverá mas y mas delgada y eventualmente la capa uniforme desaparecerá dejando atrás una capa dispersa y una capa heterogéneamente en suspensión. Este patrón de flujo es en “dos capas”, como se muestra en el espacio anular de la **Figura 5.11.(d)**.



---

### 5.4.3. PATRÓN DE FLUJO DE LA ETAPA DE FLUJO EN UNA SOLA CAPA

Finalmente, al tener la máxima velocidad de flujo para que las partículas se mantengan en suspensión en el espacio anular, la capa de recortes será erosionada hasta desaparecer y todas las partículas serán transportadas en modo de suspensión turbulenta homogénea o heterogénea para dejar limpio el agujero y tener la optima limpieza, para que no se tengan ningún problema en la perforación de pozos. Este patrón de flujo es en una sola capa como se muestra en la **Figura 5.11(e)**. El patrón de flujo que prevalecerá será determinado por el balance de fuerzas sobre el sistema.

### 5.5. MODELOS DE TRES CAPAS

Lo que se busca con este modelo es relacionar el gasto del fluido, la geometría del espacio anular, el tamaño de los recortes y las propiedades reológicas del fluido de perforación para diferentes modos de transporte<sup>[6]</sup>. Este modelo es más complejo que el modelo de dos capas debido a que toma en cuenta mas consideraciones. El sistema de flujo en el espacio anular considera una tubería excéntrica, la cual tiene un diámetro de tubería “d”, diámetro de agujero “D” y la distancia entre los dos centros agujero y tubería es “e”, como se muestra en la **Figura 5.13**.

Dentro de este modelo se pueden tener las siguientes dimensiones, concentración de sólidos y velocidades:

- Una capa con concentración uniforme, con área  $A_{bu}$ , perímetro mojado  $S_{bu}$  y concentración de sólidos  $C_{bu}$ , la cual puede ser móvil o inmóvil con velocidad uniforme  $V_{bu}$ .
- Sobre la cima de esta capa uniforme esta una capa dispersa, teniendo área  $A_{bsh}$ , perímetro mojado  $S_{bsh}$  y concentración de sólidos  $C_{bsh}$ , moviéndose con una velocidad media de  $V_{bsh}$  relativa a la capa uniforme.
- Zona de flujo-fluido, con área  $A_h$ , perímetro mojado  $S_h$  y concentración de sólidos  $C_h$ , fluyendo a una velocidad  $V_h$  sobre la capa dispersa.

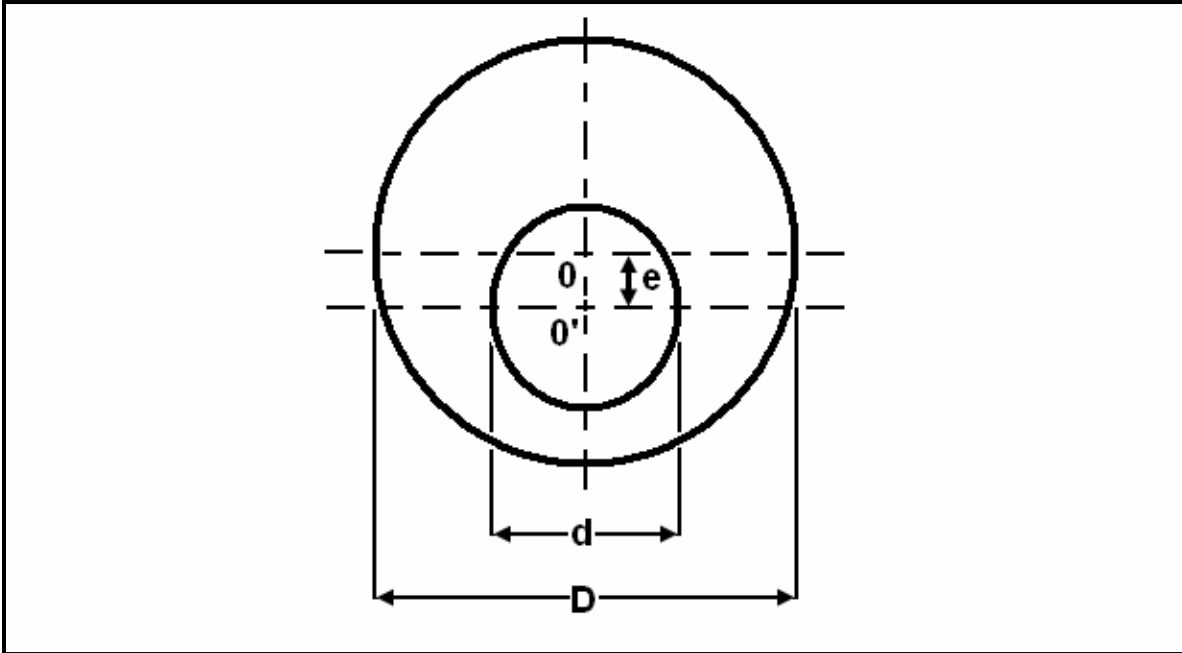


Figura 5.13. Geometría del espacio anular excéntrico.

## BALANCE DE MATERIA SOBRE EL SISTEMA DE FLUJO

En este punto, se hace la consideración que bajo condiciones de flujo constante, no existe deslizamiento entre la fase sólida y líquida, el balance de materia (ecuación de continuidad) para este flujo se escribe:

### Fase sólida

$$V_h C_h A_h + (V_{bsh} + V_{bu}) C_{bsh} A_{bsh} + V_{bu} C_{bu} A_{bu} = V_s C_s A_a \quad (5.14)$$

### Fase líquida

$$V_h (1 - C_h) A_h + (V_{bsh} + V_{bu}) (1 - C_{bsh}) A_{bsh} + V_{bu} (1 - C_{bu}) A_{bu} = V_s (1 - C_s) A_a \quad (5.15)$$

Bajo condiciones de flujo constante, el gasto volumétrico de los recortes ( $V_s C_s A_a$ ) es igual al gasto al cual los recortes están siendo generados por la barrena. La velocidad de perforación es por lo tanto relacionada con el valor de concentración de recortes  $C_s$  entrando, con la siguiente ecuación:

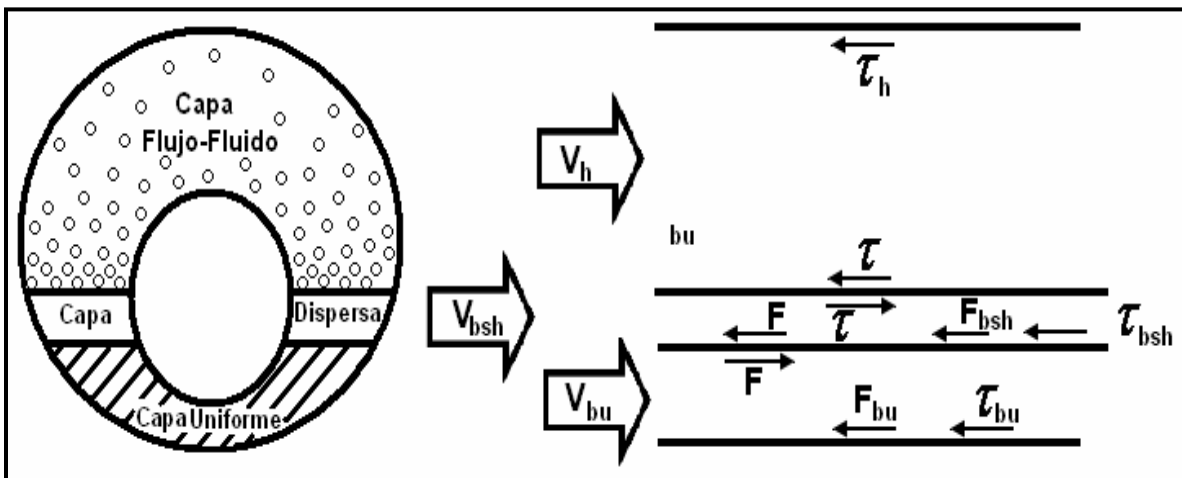
$$C_s = \frac{ROP}{V_s \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^2 \right]} \quad [\text{adimensional}] \quad (5.16)$$

## BALANCE DE FUERZAS SOBRE LA REGIÓN DE FLUJO DEL FLUIDO

En la **Figura 5.14** se pueden observar las fuerzas que actúan, sobre la zona de carga de contacto, la cual tiene un flujo de fluido limpio o suspensión turbulenta heterogénea dependiendo de las condiciones de flujo y criterios para la suspensión turbulenta.

Bajo condiciones de flujo constante, la suma de fuerzas actuando sobre la zona de flujo de fluido debe ser igual a cero:

$$-A_h \frac{dP}{dz} - \tau_h S_h - \tau_i S_i = 0 \quad (5.17)$$



**Figura 5.14.** Representación esquemática de las fuerzas actuando en el patrón de flujo de tres capas.

## BALANCE DE FUERZAS SOBRE LA REGIÓN DE CAPA DISPERSA

Sumar todas las fuerzas actuando sobre esta región:

$$-A_{bsh} \frac{dP}{dz} + \tau_i S_i - F_{bsh} - \tau_{bsh} S_{bsh} - F_{shbu} = 0 \quad (5.18)$$

---

## BALANCE DE FUERZAS SOBRE LA REGIÓN DE LA CAPA DE CONCENTRACIÓN UNIFORME

Como en las regiones anteriores, la suma de todas las fuerzas debe ser igual a cero en condiciones de flujo constante, así:

$$-A_{bu} \frac{dP}{dz} + F_{shbu} - F_{bu} - \tau_{bu} S_{bu} = 0 \quad (5.19)$$

Para la solución de este modelo en el cual el flujo de la mezcla de fluido-recortes de perforación en espacios anulares horizontales, es resolviendo el conjunto de cinco ecuaciones las cuales incluyen dos ecuaciones de continuidad (ecuaciones **(5.14)** y **(5.15)**, una para cada fase) y tres ecuaciones de momentum (ecuaciones **(5.17)**, **(5.18)** y **(5.19)**, una para cada capa).

---

## **6. DESARROLLO DEL MODELO HIDRÁULICO PROPUESTO PARA LA LIMPIEZA DE AGUJEROS EN LA PLANEACIÓN DE POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO EN LA CUENCA TERCIARIA DE VERACRUZ**

En este capítulo se describe el modelo propuesto para la limpieza de pozos de alcance extendido, lo cual ayudará a disminuir los costos por atropamiento de sartas de perforación, para optimizar la perforación de pozos de alcance extendido, esto permitirá contar con un modelo matemático para la mínima velocidad de acarreo de los recortes que garantice la limpieza del agujero en pozos de alcance extendido, tomando en cuenta las diferentes fuerzas como son: fuerza de arrastre, fuerza de elevación, fuerza de flotación, fuerza normal.

Lo que se pretende con esta investigación es homologar criterios de flujo y conocer mejor el fenómeno para poder predecir la cama de recortes que se formaría en la parte baja del espacio anular entre el agujero y la sarta de perforación para pozos direccionales, horizontales y de alcance extendido que es donde resulta mas crítica la altura de la cama de recortes, ya que en pozos verticales esta cama de recortes no se llega a formar.

El modelo matemático estará basado en el modelo de dos capas de M. Santana y A.L. Martins <sup>[1]</sup>. Este modelo se seleccionó entre el de tres capas debido a que se concluyó que en el de tres capas, la capa dispersa es teórica y resulta difícil de estimarla, y al final los resultados son muy aproximados.

Así también se marcan las bases para el programa de cómputo (**Apéndice B**), en donde se toma como base la información que a continuación se describirá. Se propone una ecuación para calcular la concentración de recortes en base a dos condiciones de frontera conocidas, la concentración en la parte superior de la suspensión es cero y la otra condición es que en la interfase la concentración de la suspensión es igual a la concentración de la cama.

### **6.1. CRITERIO DE CAMA MÓVIL DE RECORTES DE PERFORACIÓN**

Para que exista movimiento en la cama de recortes de perforación que se forma en la parte baja del pozo, se requiere que la cama se mueva a una velocidad mínima suficiente para que garantice el movimiento de los recortes y estos sean arrastrados fuera del pozo. Para un mejor entendimiento, el análisis se realizará considerando partículas de recortes de perforación esféricos ya que este caso resulta ser el más crítico, debido al arreglo que se formara esfera sobre esfera; generando una concentración de sólidos alrededor del 52%. Con esta consideración se garantiza la geometría con la mayor concentración.

---

### 6.1.1. MÁXIMA CONCENTRACIÓN EN LA CAMA DE RECORTES DEBIDO A PARTÍCULAS ESFÉRICAS

Para obtener el dato de máxima concentración se partirá de un cubo con longitud  $L$  y dentro de el una esfera de radio  $r$ . Entonces  $L=2r$ .

El volumen de la partícula ( $V_p$ ) se considerará el volumen de la esfera formada por dicho recorte, esto es debido a que entre mas pequeño el recorte causará mayor incremento en la cama de recorte, así también entre mas pequeño sea el recorte mas redondeado es, por ello:

$$V_p = \frac{4}{3} \pi r_p^3$$

El volumen total ( $V_T$ ) del cubo será:

$$V_T = L^3$$

Entonces

$$V_T = (2r_p)^3 = 8r_p^3$$

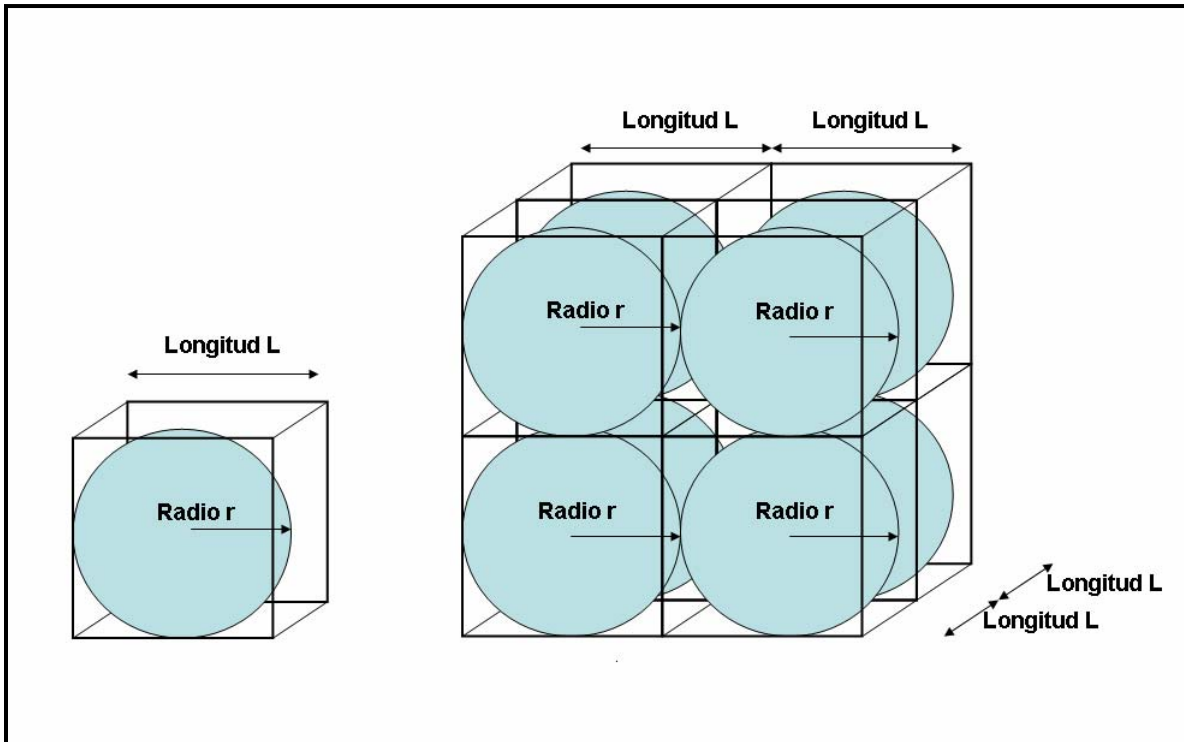
Para este caso la concentración de sólidos en la cama ( $C_B$ ) que tendremos será:

$$C_B = \frac{V_p}{V_T} = \frac{\frac{4}{3} \pi r_p^3}{8r_p^3}$$

Eliminando términos  $r_p^3$  en el numerador y denominador nos queda un valor que no es función del radio, sino una constante:

$$C_B = \frac{\pi}{6} = 0.52$$

Entonces la concentración de sólidos en la cama ( $C_B$ ) será del 52%.



**Figura 6.1.** Esquema representativo de la concentración de sólidos en la cama de arena.

### 6.1.2. CALCULO DE LAS FUERZAS PRESENTES EN EL MOVIMIENTO DE UNA CAMA DE PARTÍCULAS

Inicialmente se busca encontrar la velocidad mínima necesaria para iniciar el movimiento de una cama de sólidos en flujo ascendente, tomando en cuenta la inclinación del pozo y las fuerzas que actúan sobre las partículas de la cama de recortes<sup>[2]</sup>. En este caso con la mínima velocidad de la cama de recortes se tendrá un gasto mínimo, al incrementar este gasto existirá otro gasto en el cual no existirá cama de recortes, la cual será erosionada.

Analizando la **Figura 6.2** se puede apreciar que si  $\theta = 0$  tenemos un pozo horizontal y las longitudes  $L_1$  y  $L_2$  serán iguales. Así también  $L_D$  y  $L_2$  son independientes del ángulo de inclinación del pozo, por consiguiente la única longitud que podrá variar es  $L_1$ .

Se tendrán que calcular las longitudes  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_D$ . Para lo cual se partirá de los triángulos que se forman en dichas secciones.

$L_D$  se forma del triángulo equilátero con longitud  $r_p$  en cada uno de sus lados y será la altura de este, en este caso coincide con la apotema del hexágono que se forma dentro de la partícula esférica que ascenderá.

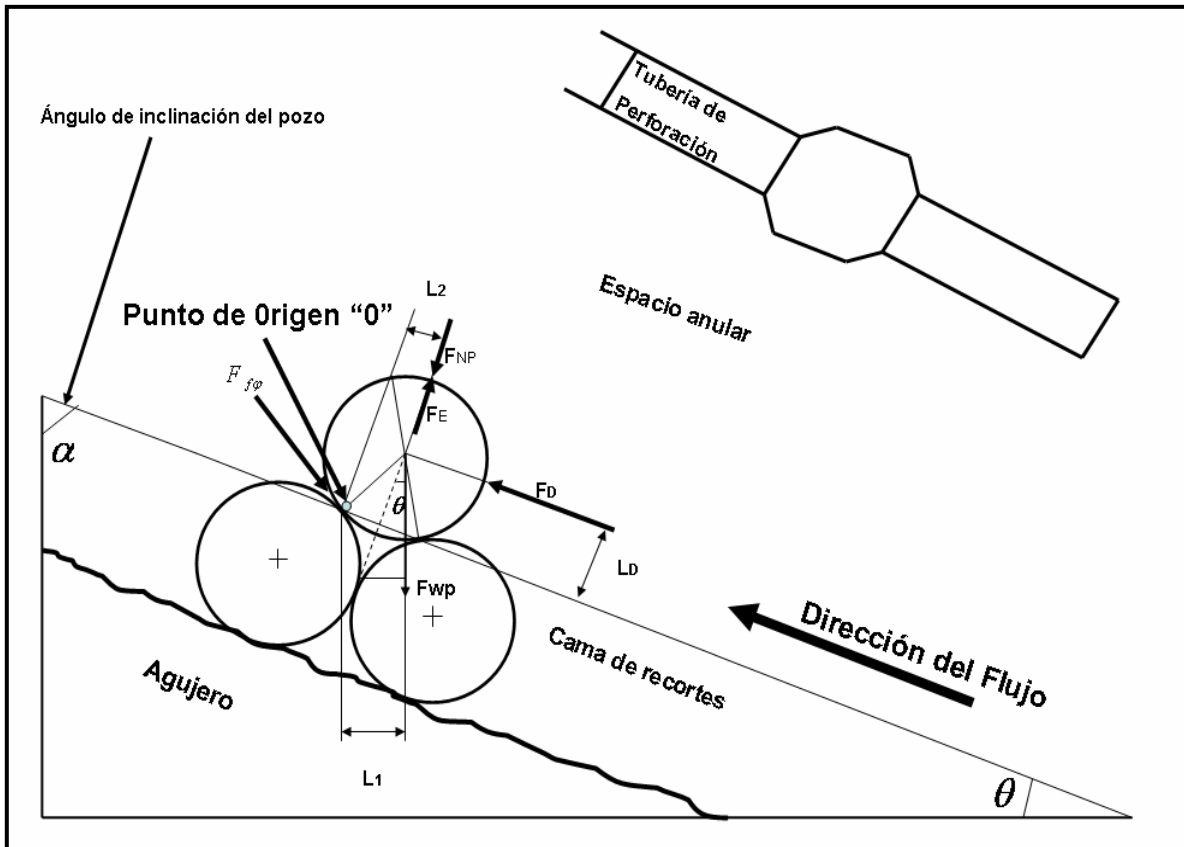


Figura 6.2. Representación esquemática de las fuerzas presentes en el movimiento de partículas dentro de una cama de partículas.

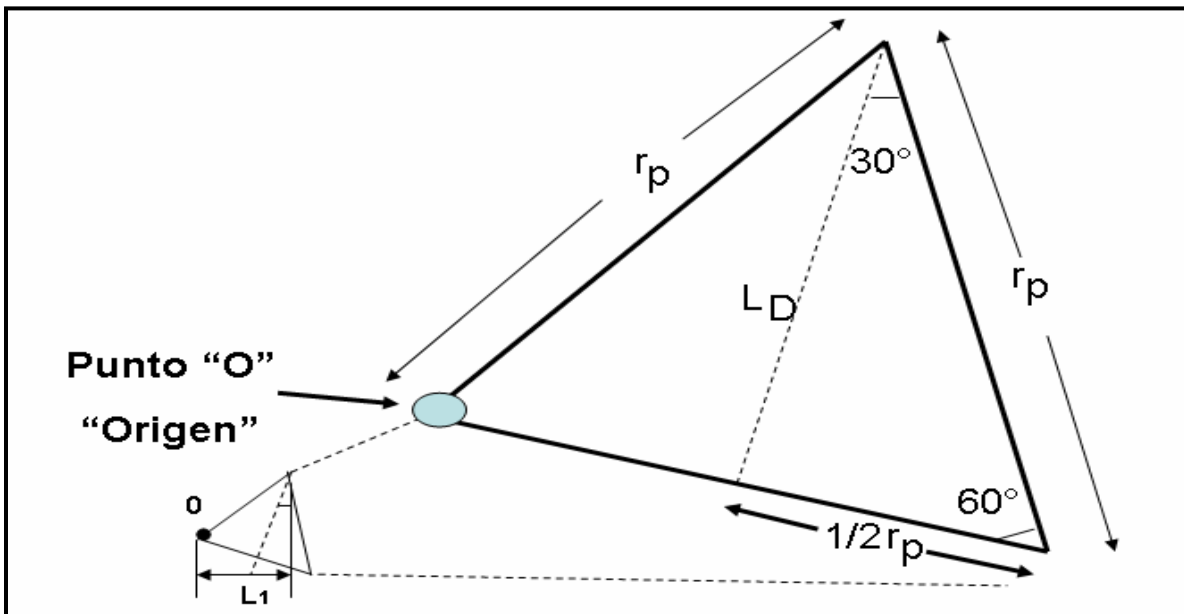


Figura 6.3. Proyección del triángulo equilátero formado dentro del área proyectada de la partícula esférica del recorte de perforación.



---

De forma general la función coseno resulta en:

$$\text{Cos}\beta = \frac{\text{CatetoAdyacente}}{\text{Hipotenusa}}$$

De la **Figura 6.3** se observa que  $\beta = 30^\circ$  y que  $\text{Hipotenusa} = r_p$

$$\text{Cos}30^\circ = \frac{L_D}{r_p}$$

Despejando  $L_D$

$$L_D = r_p \text{Cos}30^\circ$$

Pero  $\text{Cos}30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$

Entonces

$$L_D = \frac{\sqrt{3}}{2} r_p$$

Donde  $r_p$  es el radio de la partícula sólida o recorte de perforación.

$L_1$  se forma de la base del triángulo donde aparece  $\theta$  como se muestra en la **Figura 6.4**.

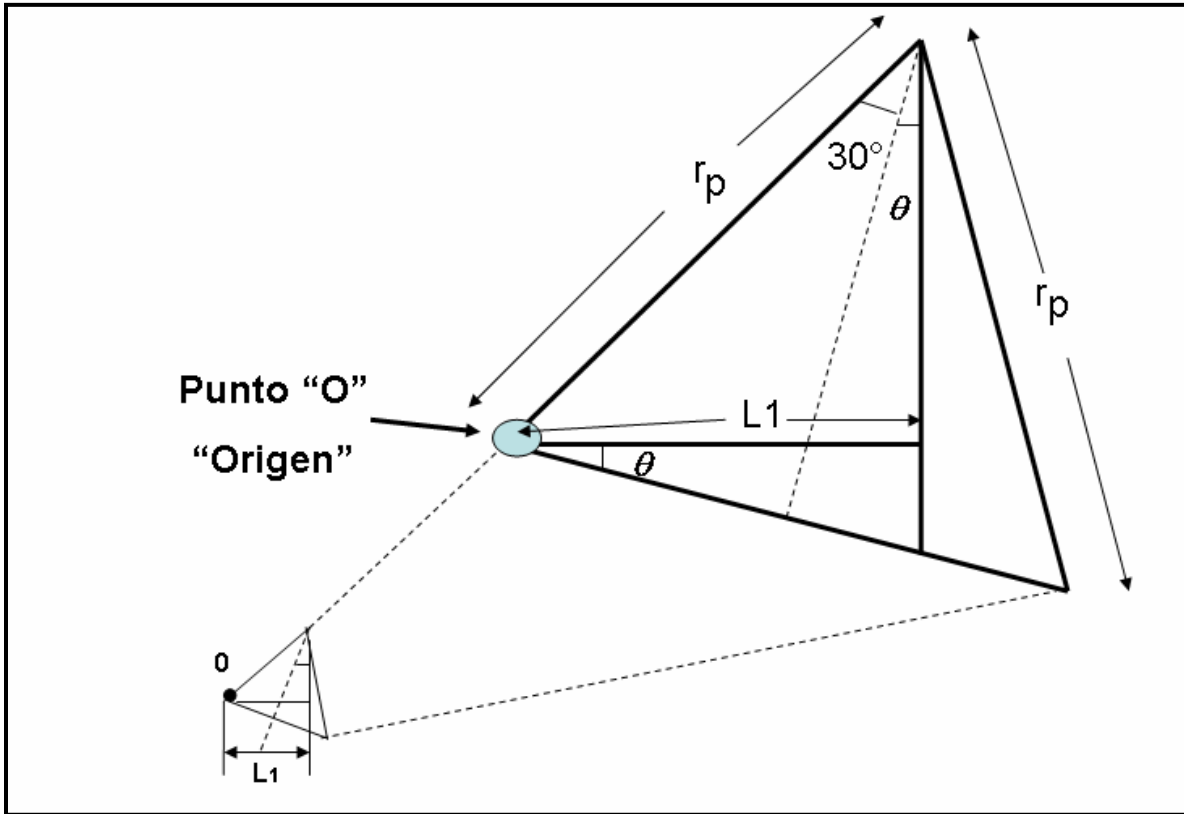


Figura 6.4. Proyección del triángulo rectángulo donde interviene  $\theta$  formado dentro del área proyectada de la partícula esférica del recorte de perforación.

De forma general de la función Seno se tiene:

$$\text{Sen}\phi = \frac{\text{CatetoOpuesto}}{\text{Hipotenusa}}$$

De la **Figura 6.4** se observa que  $\phi = \theta + 30^\circ$  y que  $\text{Hipotenusa} = r_p$

Al agregar  $30^\circ$  a  $\phi$  se sigue cumpliendo la función seno debido a que el triángulo formado con longitud  $L_1$  siempre será un triángulo rectángulo.

Sustituyendo  $\theta$  y  $r_p$

$$\text{Sen}(\theta + 30^\circ) = \frac{L_1}{r_p}$$

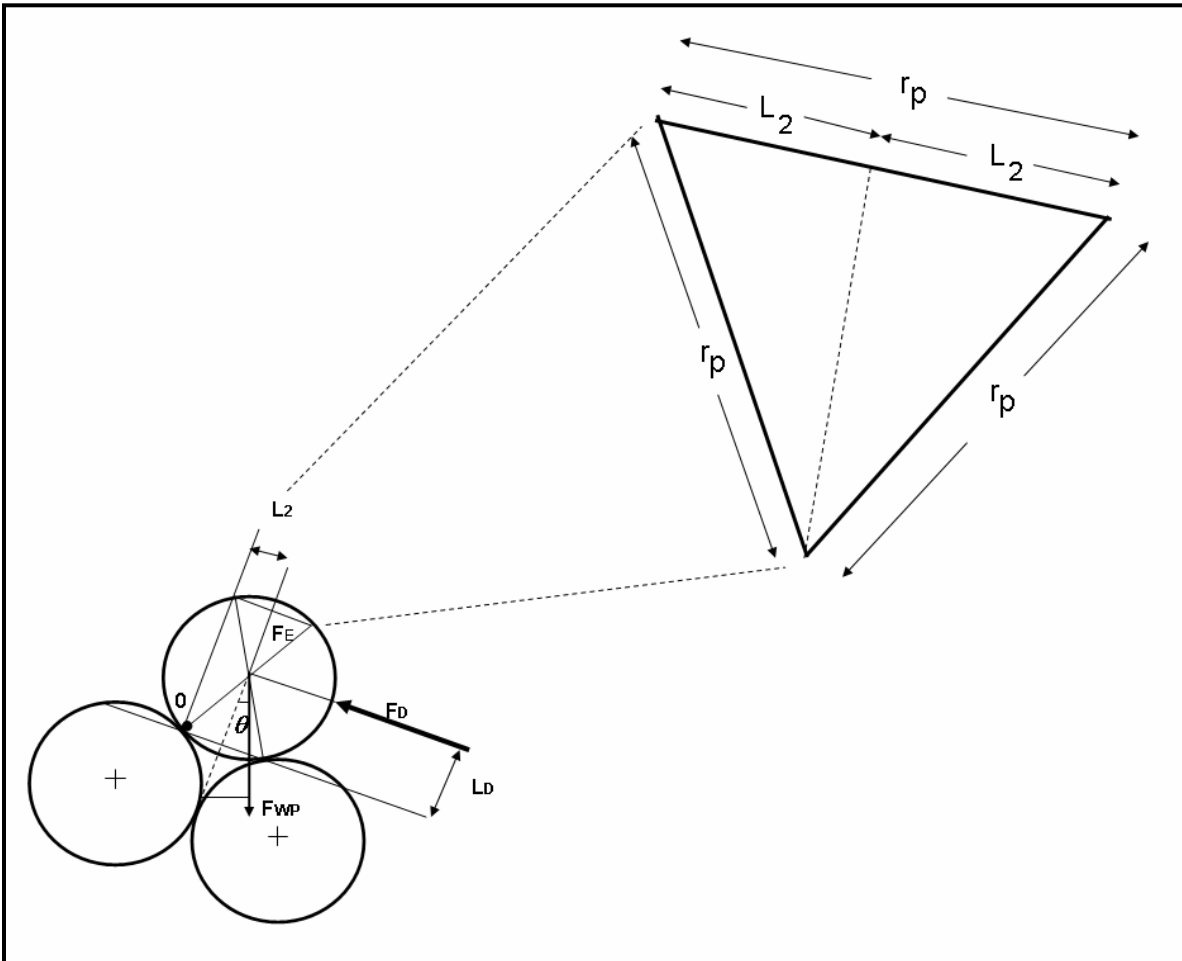
---

Despejando  $L_1$  el resultado será:

$$L_1 = r_p \text{Sen}(30 + \theta)$$

$L_2$  Resulta ser la mitad de  $r_p$  .como se muestra en la **Figura 6.5**, por lo tanto:

$$L_2 = \frac{1}{2} r_p$$



**Figura 6.5.** Proyección del triángulo rectángulo formado dentro del área proyectada de la partícula esférica del recorte de perforación.

---

### 6.1.3. SUMA DE MOMENTO DE LAS FUERZAS RESPECTO AL PUNTO DE ORIGEN

Se procederá a realizar una sumatoria de momento con respecto al punto 0 de la **Figura 6.2**, esto con el fin de obtener una expresión de velocidad mínima de inicio de movimiento de la cama de sólidos.

$$\sum M_0 = 0$$

Se toman en cuenta todas las fuerzas que intervienen a través del punto 0. Recordando que el momento de un vector se considera positivo cuando el giro producido va en contra de las manecillas del reloj y negativo cuando el giro producido va de acuerdo a las manecillas del reloj. Considerando esta condición se tiene:

$$F_D L_D - F_{WP} L_1 - F_{NP} L_2 + F_E L_2 + F_{f\phi}^*(0) = 0$$

En este caso la fuerza de fricción  $F_f$  se vuelve cero debido a que pasa por el punto 0 a una distancia cero.

$$F_D L_D - F_{WP} L_1 - F_{NP} L_2 + F_E L_2 = 0$$

Donde:

$F_D$  Fuerza de arrastre

$F_{WP}$  Fuerza de flotación de la partícula

$F_{NP}$  Fuerza Normal que actúa sobre toda la altura de la cama de recortes

$F_E$  Fuerza de Elevación

A continuación se describen cada una de las fuerzas que intervienen en la sumatoria de momento en el punto 0.

#### Fuerza de Flotación de la Partícula <sup>[2]</sup>

$$F_{WP} = V_p (\rho_r - \rho_L) g$$

---

Sustituyendo el Volumen de la partícula (recortes)  $V_p$  :

$$F_{WP} = \frac{4}{3} \pi r_p^3 (\rho_r - \rho_L) g$$

Donde:

$\rho_r$  Densidad del recorte de perforación (partícula)

$\rho_L$  Densidad del líquido

$g$  Gravedad  $\left[ \frac{L}{T^2} \right]$

### Fuerza Normal de la Partícula<sup>[2]</sup>

La fuerza normal que actúa sobre el sistema toma en cuenta las partículas de la cama de recortes que están sobre la primer partícula que está en contacto con el agujero, para representar esta fuerza podemos observar la **Figura 6.6** donde se aprecia que se tienen que contar todas las partículas de forma vertical de la cama.

El número de partículas que se encuentran sobre la que está en contacto con el agujero se puede calcular de la siguiente forma:

$$No.Particulas = \frac{h_B - D_p}{D_p}$$

$$No.Particulas = \frac{h_B}{D_p} - 1$$

Donde:

$h_B$  Altura de la cama de recortes

$D_p$  Diámetro del recorte de perforación (o partícula)

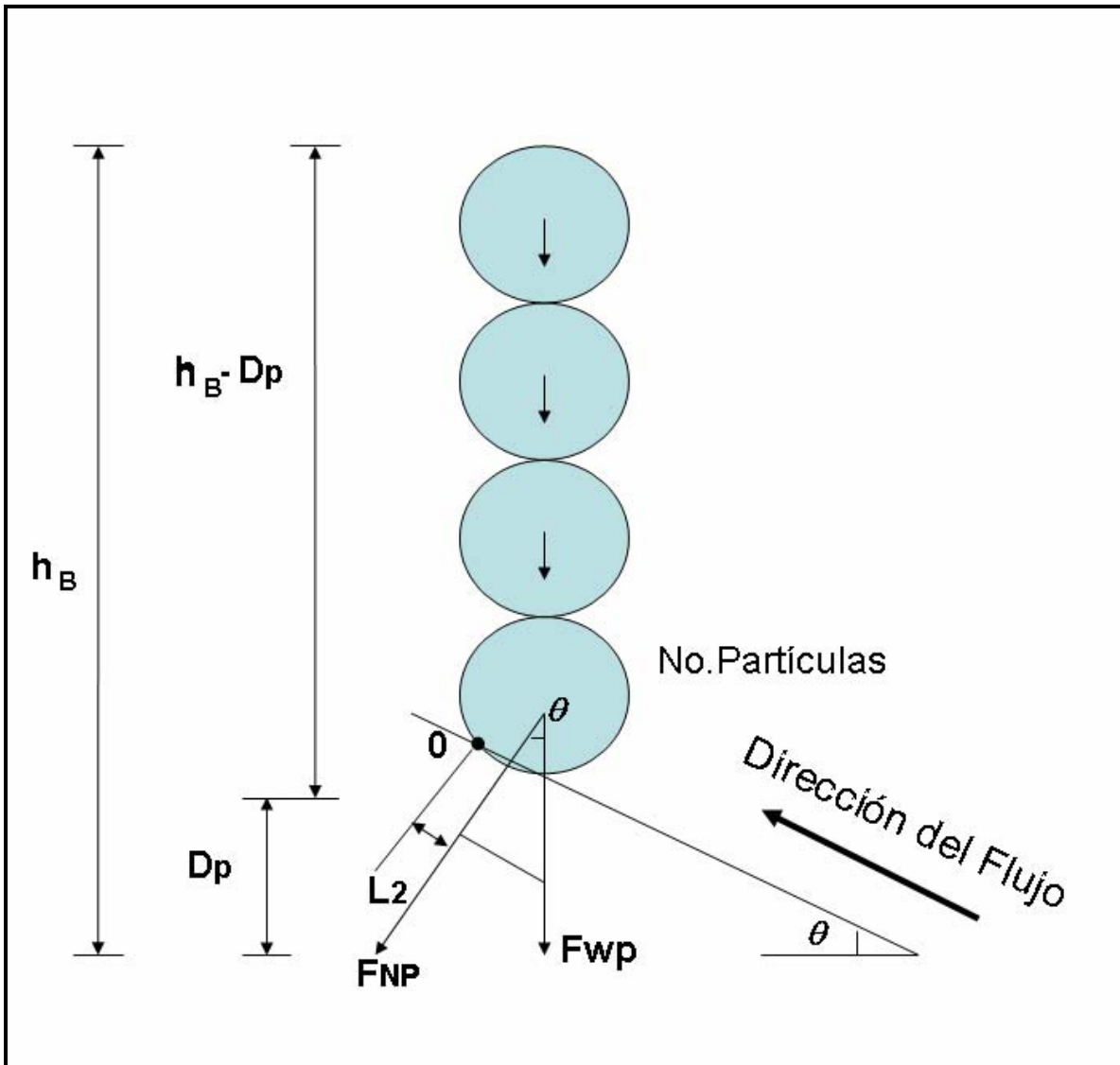
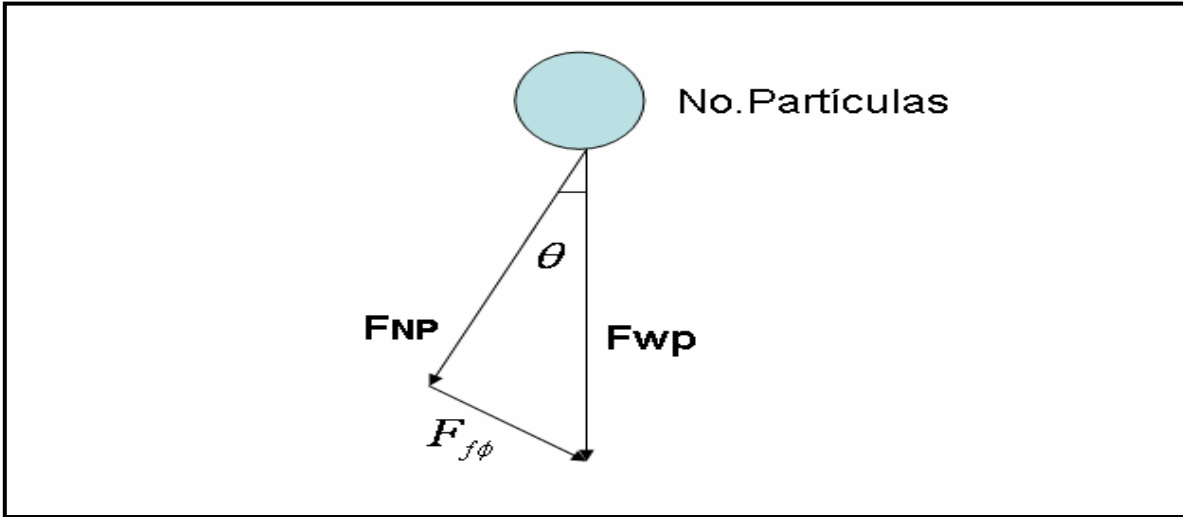


Figura 6.6. Representación esquemática de la Fuerza Normal de la Partícula que actúa en el sistema.

Se tienen que multiplicar por la concentración de la cama, ya que la fuerza normal de la partícula esta aplicada a los sólidos, en este caso de esferas  $C_B = 0.52$ .

Ahora se tiene que obtener la componente de la fuerza normal de la partícula, se toma solo la parte que interesa:



**Figura 6.7. Proyección de la Fuerza Normal.**

De forma general con la función Coseno se tiene:

$$\text{Cos}\theta = \frac{\text{CatetoAdyacente}}{\text{Hipotenusa}}$$

De la **Figura 6.7** se observa que  $\text{CatetoAdyacente} = F_{NP}$  y que  $\text{Hipotenusa} = F_{WP}[\text{No.Particulas}]$ ,

$$\text{Cos}\theta = \frac{F_{NP}}{F_{WP}[\text{No.Particulas}]}$$

Despejando la fuerza normal de la partículas  $F_{NP}$

$$F_{NP} = F_{WP}[\text{No.Particulas}]\text{Cos}\theta$$

Sustituyendo el número de partículas a las que será aplicada esa fuerza normal de la partícula y la fuerza de flotación de la partícula ( $F_{WP}$ )

$$F_{NP} = \frac{4}{3}\pi r_p^3(\rho_r - \rho_L)gC_B\left[\frac{h_B}{D_P} - 1\right]\text{Cos}\theta$$

### Fuerza de Elevación<sup>[3]</sup>

$$F_E = \frac{1}{2} C_L A_E \rho_L U_{\min B}^2$$

$$A_E = \pi r_p^2$$

$C_L$  Coeficiente de Elevación

$A_E$  Área de elevación de la partícula perpendicular al flujo

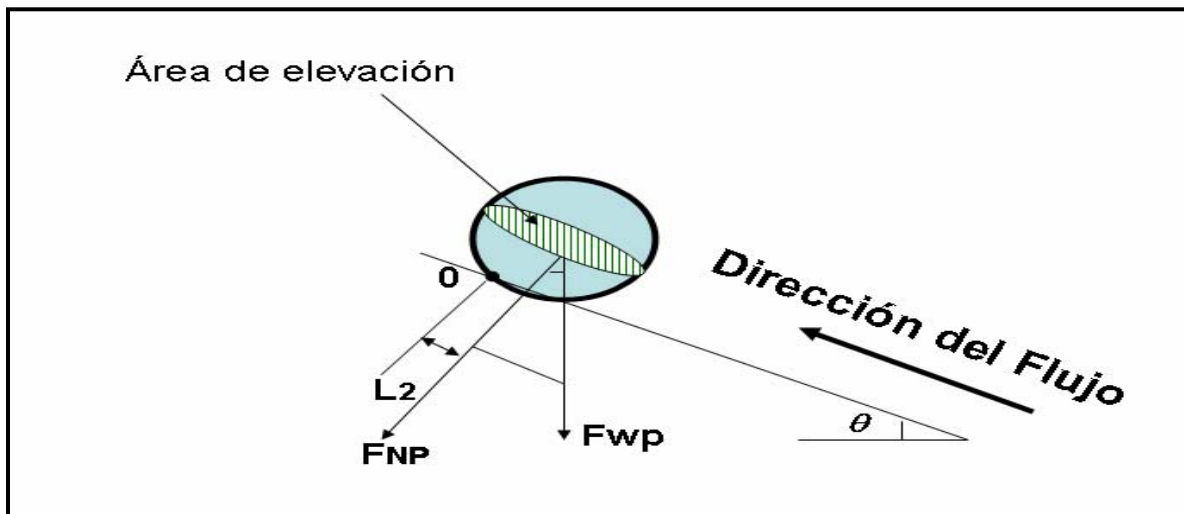


Figura 6.8. Proyección del área de elevación.

### Fuerza de Arrastre<sup>[2,4,5]</sup>

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_L U_{\min B}^2 C_D A_D$$

$$A_p = \pi r_p^2$$

Para el Coeficiente de Arrastre<sup>[3]</sup> se tiene:

$$C_D = \left( \frac{30 \mu_e}{d_p v_s \rho_L} \right) + 1.25 \quad \text{ó} \quad C_D = \frac{4}{3} \frac{g d_p}{v_p^2} \left( \frac{\rho_r - \rho_L}{\rho_L} \right)$$



Donde:

- $U_{\min B}$  Velocidad mínima para que se mueva la cama
- $C_D$  Coeficiente de arrastre
- $A_D$  Área de arrastre proyectada de la partícula en la dirección al flujo
- $v_s$  Velocidad de asentamiento
- $\mu_e$  Viscosidad Efectiva

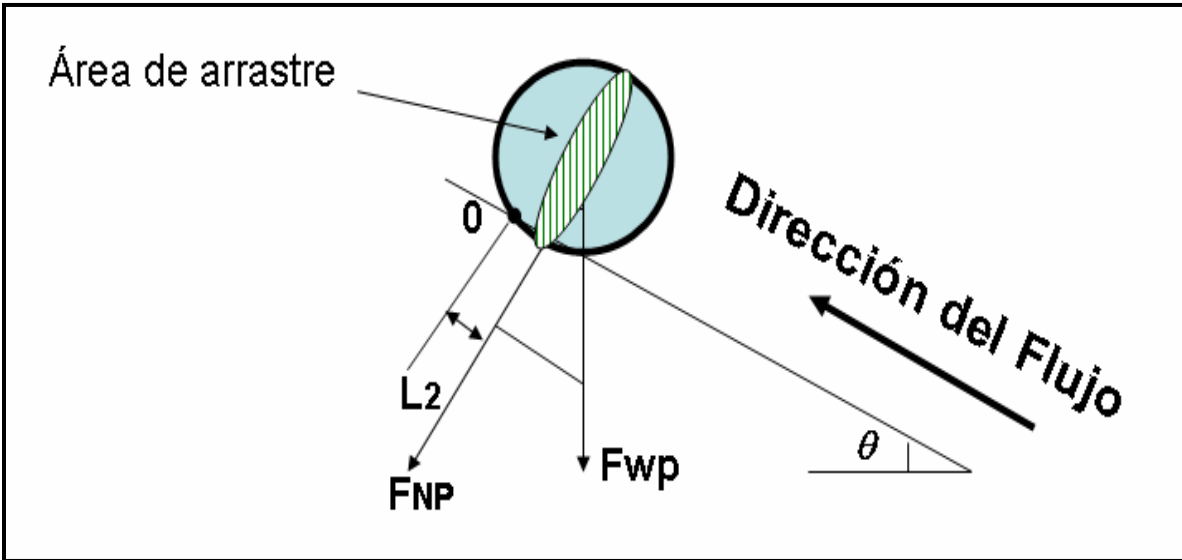


Figura 6. 9. Proyección del área de arrastre

$A_D = A_E$  El área proyectada de la partícula es igual al área de elevación debido a que se consideró el recorte con forma de esfera y resulta ser la misma área paralela al flujo y perpendicular al flujo.

#### 6.1.4. VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO

Para la velocidad de asentamiento se toma la correlación de Chien<sup>[6]</sup> , la cual es:

Régimen de resbalamiento laminar si  $v_s \leq 100$  [cm/seg] entonces:

$$v_s = 120 \left( \frac{\mu_e}{10D_p \rho_L} \right) \left[ \sqrt{1 + 0.0727 d_p \left( \frac{\rho_r}{\rho_L} - 1 \right) \left( \frac{10D_p \rho_L}{\mu_e} \right)^2} - 1 \right]$$

Régimen de resbalamiento turbulento si  $v_s > 100$  [cm/seg] entonces:

$$v_s = 32.355 \sqrt{D_p \left[ \left( \frac{\rho_r}{\rho_L} \right) - 1 \right]}$$

### 6.1.5. CALCULO DE LA VELOCIDAD MÍNIMA DE LA CAMA DE RECORTES DE PERFORACIÓN

Retomando la sumatoria de momento con respecto al origen:

$$F_D L_D - F_{WP} L_1 - F_{NP} L_2 + F_E L_2 = 0$$

Sustituyendo todos los términos de fuerzas y longitudes resulta:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \rho_L U_{\min B}^2 C_D A_D \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} r_p \right] - \frac{4}{3} \pi [r_p^3] (\rho_r - \rho_L) g [r_p] \text{Sen} \left[ \frac{\pi}{6} + \theta \right] \\ & - \frac{4}{3} \pi r_p^3 (\rho_r - \rho_L) g C_B \left[ \frac{h_B}{D_p} - 1 \right] (\text{Cos} \theta) \left[ \frac{1}{2} r_p \right] + \frac{1}{2} C_L A_E \rho_L U_{\min B}^2 \frac{1}{2} r_p = 0 \end{aligned}$$

Asociando términos

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \rho_L U_{\min B}^2 C_D A_D \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} r_p \right] + \frac{1}{2} C_L A_E \rho_L U_{\min B}^2 \frac{1}{2} r_p \\ & = \left[ \frac{4}{3} \pi r_p^3 (\rho_r - \rho_L) g r_p \right] \text{Sen} \left[ \frac{\pi}{6} + \theta \right] + \frac{4}{3} \pi r_p^3 (\rho_r - \rho_L) g C_B \left[ \frac{h_B}{D_p} - 1 \right] (\text{Cos} \theta) \left[ \frac{1}{2} r_p \right] \end{aligned}$$

Agrupando con respecto a la  $U_{\min B}$ :

$$\begin{aligned} & U_{\min B}^2 \left[ \frac{1}{2} \rho_L C_D A_D \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} * r_p \right] + \frac{1}{2} C_L A_E \rho_L \frac{1}{2} r_p \right] \\ & = \frac{4}{3} \pi * r_p^3 (\rho_r - \rho_L) g * r_p \left[ \text{Sen} \left[ \frac{\pi}{6} + \theta \right] + \frac{1}{2} C_B \left[ \frac{h_B}{D_p} - 1 \right] (\text{Cos} \theta) \right] \end{aligned}$$

Despejando  $U_{\min B}$  se tiene:

$$U_{\min B} = \sqrt{\frac{\frac{4}{3} \pi * r_p^3 (\rho_r - \rho_L) g * r_p \left[ \text{Sen} \left[ \frac{\pi}{6} + \theta \right] + \frac{1}{2} C_B \left[ \frac{h_B}{D_p} - 1 \right] \right] (\text{Cos} \theta)}{\left[ \frac{1}{2} \rho_L C_D A_D \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} * r_p \right] + \frac{1}{2} C_L A_E \rho_L \frac{1}{2} r_p \right]}}$$

Eliminando términos

$$U_{\min B} = \sqrt{\frac{\frac{8}{3} \pi * r_p^3 (\rho_r - \rho_L) g \left[ \text{Sen} \left[ \frac{\pi}{6} + \theta \right] + \frac{1}{2} C_B \left[ \frac{h_B}{D_p} - 1 \right] \right] (\text{Cos} \theta)}{\left[ \rho_L C_D A_D \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \right] + C_L A_E \rho_L \frac{1}{2} \right]}}$$

Sustituyendo  $A_D$  y  $A_E$

$$U_{\min B} = \sqrt{\frac{\frac{8}{3} \pi * r_p^3 (\rho_r - \rho_L) g \left[ \text{Sen} \left[ \frac{\pi}{6} + \theta \right] + \frac{1}{2} C_B \left[ \frac{h_B}{D_p} - 1 \right] \right] (\text{Cos} \theta)}{\frac{\pi * r_p^2}{2} \rho_L [C_D [\sqrt{3}] + C_L]}}$$

Eliminando términos

$$U_{\min B} = \sqrt{\frac{\frac{16}{3} * r_p (\rho_r - \rho_L) g \left[ \text{Sen} \left( \frac{\pi}{6} + \theta \right) + \frac{1}{2} C_B \left( \frac{h_B}{D_p} - 1 \right) \right] \text{Cos} \theta}{\rho_L [(\sqrt{3}) C_D + C_L]}}$$

Finalmente

$$U_{\min B} = \sqrt{\frac{16(g)r_p}{3[(\sqrt{3})C_D + C_L]} \left[ \frac{\rho_r}{\rho_L} - 1 \right] \left[ \text{Sen} \left( \frac{\pi}{6} + \theta \right) + \frac{1}{2} C_B \left( \frac{h_B}{D_p} - 1 \right) \right] \text{Cos} \theta} \quad \mathbf{(6.a)}$$

Por lo tanto la velocidad mínima de la cama<sup>[7]</sup> de recortes de perforación  $U_{\min B}$  será la ecuación anterior. Si se tiene un gasto a la velocidad mínima de la cama de recortes, se garantiza que se está en el límite para que el pozo este en condiciones de circular y de sacar los recortes a la superficie.

## 6.2. BALANCE DE MATERIA

Ahora se partirá de un balance de materia para encontrar las ecuaciones que rigen el modelo de dos capas.

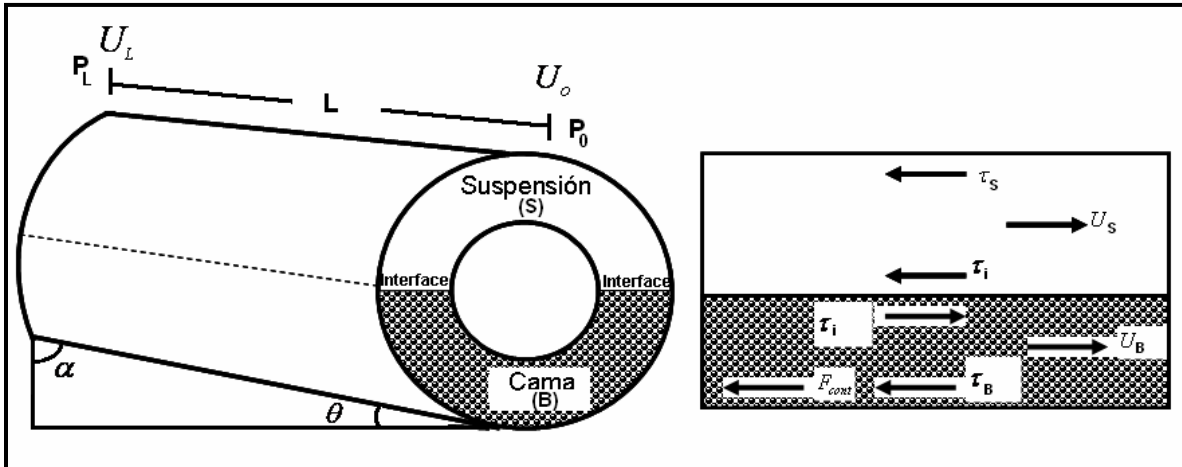


Figura 6.10. Diagrama esquemático del modelo planteado mostrando el ángulo de inclinación.

Considerando continuidad, la masa no se crea ni se destruye:

$$Q = UA \quad \text{Gasto Volumétrico}$$

$$\dot{Q} = \rho UA \quad \text{Gasto másico}$$

Retomando el modelo de dos capas se tiene ahora, cada parte se multiplica por su respectiva concentración:

De la **Figura 6.11** las variables son:

$$Q_S = A_S U_S C_S$$

$$Q_B = A_B U_B C_B$$

$$Q_m = A_m U_m C_m$$

---

Donde:

- $Q_S$  Gasto de la suspensión de sólidos  
 $Q_B$  Gasto de la cama de recortes  
 $Q_m$  Gasto total de la mezcla  
 $A_S$  Área de la suspensión  
 $A_B$  Área de la cama de recortes  
 $A_m$  Área total del espacio anular  
 $U_S$  Velocidad media de la suspensión  
 $U_B$  Velocidad media de la cama de recortes  
 $U_m$  Velocidad total de la mezcla  
 $C_S$  Concentración de sólidos en la suspensión  
 $C_m$  Concentración total de la mezcla

Lo que entra es igual a lo que sale, por ello:

$$Q_S + Q_B = Q_m$$

Para la fase sólida:

$$\rho_S U_S A_S C_S + \rho_B U_B A_B C_B = \rho_m U_m A_m C_m$$

Donde

- $\rho_S$  Densidad de la suspensión  
 $\rho_B$  Densidad de la cama de recortes  
 $\rho_m$  Densidad total de la mezcla considerando la suspensión y la cama de recortes

Para un gasto volumétrico tenemos:

$$U_S A_S C_S + U_B A_B C_B = U_m A_m C_m \quad (6.1)$$

Para la fase líquida:

$$\rho_S U_S A_S (1 - C_S) + \rho_B U_B A_B (1 - C_B) = \rho_m U_m A_m (1 - C_m)$$

---

Para un gasto volumétrico

$$U_S A_S (1 - C_S) + U_B A_B (1 - C_B) = U_m A_m (1 - C_m) \quad (6.2)$$

### 6.2.1. BALANCE DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO

En base a la **Figura 6.10** y haciendo la analogía de flujo a través de un tubo circular<sup>[8]</sup>, se realizará el balance de cantidad de movimiento:

Velocidad de cantidad de movimiento a través de la superficie de la suspensión  $S_S L \tau_s$

Velocidad de cantidad de movimiento a través de la superficie de la interfase  $S_i L \tau_i$

Velocidad de entrada de cantidad de movimiento a través de la superficie anular situada en  $Z=0$   $A_S U_S (\rho_S U_S)_{z=0}$

Velocidad de salida de cantidad de movimiento a través de la superficie anular situada en  $Z=L$   $A_S U_S (\rho_S U_S)_{z=L}$

Fuerza de gravedad que actúa sobre el fluido  $A_S L \rho_s g \text{Sen} \theta$

Fuerza de presión que actúa sobre la superficie anular  $A_S$  situada en  $Z=0$   $A_S P_0$

Fuerza de presión que actúa sobre la superficie anular  $A_S$  situada en  $Z=L$   $A_S P_L$

Donde:

$S_S$  Perímetro de la suspensión

$S_i$  Perímetro de la interfase

- 
- $L$  Longitud de estudio
  - $\tau_s$  Esfuerzo de corte de la suspensión
  - $\tau_i$  Esfuerzo de corte de la interfase
  - $P_0$  Presión en el punto 0 (a la entrada de la sección de estudio)
  - $P_L$  Presión en el punto L (a la salida de la sección de estudio)

Sustituyendo los términos en el balance de cantidad de movimiento, considerando estado constante, densidad constante en un espacio anular de longitud  $L$ , radios  $r_{int}$  y  $r_{ext}$ , fluido incompresible y flujo laminar.

$$S_s L \tau_s + S_i L \tau_i + A_s U_s (\rho_s U_s) \Big|_{z=0} - A_s U_L (\rho_s U_s) \Big|_{z=L} + A_s L \rho_s g \text{Sen} \theta + A_s P_0 - A_s P_L = 0$$

Agrupando

$$S_s L \tau_s + S_i L \tau_i + A_s \rho_s \left[ \overbrace{(U_s^2) \Big|_{z=0}}^{\text{Fluido Incompresible } U_s \Big|_{z=0} = U_s \Big|_{z=L}} - (U_s^2) \Big|_{z=L} \right] + A_s L \rho_s g \text{Sen} \theta + A_s [P_0 - P_L] = 0$$

$$S_s L \tau_s + S_i L \tau_i + A_s L \rho_s g \text{Sen} \theta + A_s [P_0 - P_L] = 0$$

Separando

$$A_s [P_L - P_0] = S_s L \tau_s + S_i L \tau_i + A_s L \rho_s g \text{Sen} \theta$$

Dividiendo entre la longitud  $L$  toda la ecuación

$$A_s \left[ \frac{P_L - P_0}{L} \right] = S_s \tau_s + S_i \tau_i + A_s \rho_s g \text{Sen} \theta$$

Pero  $\Delta P = P_L - P_0$

Finalmente

$$A_s \left[ \frac{\Delta P}{L} \right] = S_s \tau_s + S_i \tau_i + A_s \rho_s g \text{Sen} \theta \tag{6.3}$$

Haciendo las mismas consideraciones se realiza el balance de cantidad de movimiento para la cama de recortes y se tiene:

$$S_B L \tau_B - S_i L \tau_i + A_B U_B (\rho_B U_B) \Big|_{z=0} - A_B U_L (\rho_B U_B) \Big|_{z=L} + A_B L \rho_B g \text{Sen} \theta + A_B P_0 - A_B P_L + F_{cont} = 0$$

Donde:

- $S_B$       Perímetro de la cama de recortes  
 $\tau_B$       Esfuerzo de corte de la cama de recortes

Agrupando

$$S_B L \tau_B - S_i L \tau_i + A_B \rho_B \left[ (U_B^2) \Big|_{z=0} - (U_L^2) \Big|_{z=L} \right] + A_B L \rho_B g \text{Sen} \theta + A_B [P_0 - P_L] + F_{cont} = 0$$

Fluido Incompresible  $U_{cama} \Big|_{z=0} = U_{cama} \Big|_{z=L}$

$$S_B L \tau_B - S_i L \tau_i + A_B L \rho_B g \text{Sen} \theta + A_B [P_0 - P_L] + F_{cont} = 0$$

Separando

$$A_B [P_L - P_0] = S_B L \tau_B - S_i L \tau_i + A_B L \rho_B g \text{Sen} \theta + F_{cont}$$

Dividiendo entre la longitud  $L$  toda la ecuación

$$A_B \left[ \frac{P_0 + P_L}{L} \right] = \frac{S_B L \tau_B}{L} - \frac{S_i L \tau_i}{L} + \frac{A_B L \rho_B g \text{Sen} \theta}{L} + \frac{F_{cont}}{L}$$

Pero  $\Delta P = P_L - P_0$

$$A_B \left[ \frac{\Delta P}{L} \right] = S_B \tau_B - S_i \tau_i + A_B \rho_B g \text{Sen} \theta + \frac{F_{cont}}{L}$$

Finalmente

$$\frac{F_{cont}}{L} = A_B \left[ \frac{\Delta P}{L} \right] - S_B \tau_B + S_i \tau_i - A_B \rho_B g \text{Sen} \theta \quad (6.4)$$



---

$F_{cont}$  es la fuerza de contacto entre las partículas y la pared del pozo<sup>[9]</sup> y  $\tau_B$  es el esfuerzo de corte de la cama de arena en movimiento actuando sobre el perímetro mojado  $S_B$ .

Para el caso de  $\tau_S$  se calcula con la siguiente relación<sup>[1,3,10,11,12,13]</sup>:

$$\tau_S = \frac{1}{2} f_S \rho_S U_S^2$$

Para la densidad de la suspensión<sup>[11]</sup> se utiliza la siguiente ecuación, se puede notar que  $\rho_S$  no es constante, ya que  $C_S$  es variable de acuerdo a la posición “y” que se tome, pero si tomamos un promedio integral (ver cálculo de la concentración de la suspensión en los puntos 6.6, 6.6.1, 6.6.2 y 6.6.3 de este capítulo) se puede calcular:

$$\rho_S = \rho_r C_S + \rho_L (1 - C_S)$$

El factor de fricción  $f_S$  entre la suspensión y la pared del pozo fue definido por Doron<sup>(3)</sup>

$$f_S = 0.00454 + 0.645 \text{Re}_S^{-0.7}$$

Para el caso de  $\tau_B$  se calcula con la siguiente relación<sup>[1,11,12,13]</sup>:

$$\tau_B = \frac{1}{2} f_B \rho_B U_B^2$$

Para la densidad de la cama de recortes se tiene<sup>[11,15]</sup>

$$\rho_B = \rho_r C_B + \rho_L (1 - C_B)$$

El factor de fricción de la cama de recortes contra la pared del pozo fue determinado de manera experimental por Doron<sup>[9,14]</sup>

$$f_B = 0.046 \text{Re}_B^{-0.2}$$

---

Para el caso de  $\tau_i$  se hace una diferencia de velocidades al cuadrado debido a que es la velocidad de la suspensión y la velocidad de la cama las que actúan sobre el esfuerzo cortante de la interfase<sup>[1,12]</sup>:

$$\tau_i = \frac{1}{2} f_i \rho_s [U_s^2 - U_B^2]$$

El factor de fricción para la interfase fue el resultado de una prueba piloto de Martins<sup>[12]</sup>

$$f_i = 0.966368 \text{Re}_s^{-1.07116} n^{2.360211} \left( \frac{d_p}{D_{hS}} \right)^{-2.34539}$$

$n$  se despeja de la relación de los valores del viscosímetro Fann<sup>[6]</sup>:

$$\frac{R_{100} - R_3}{R_6 - R_3} = \frac{33.333^n - 1}{2^n - 1}$$

El diámetro hidráulico de la suspensión es:

$$D_{hS} = \frac{4A_S}{S_S}$$

En el diámetro hidráulico de la suspensión ( $D_{hS}$ ), no se toma en cuenta el perímetro de la interfase, es debido a que es en base a la teoría de canales abiertos<sup>[15,16]</sup>

## 6.2.2. NUMERO DE REYNOLDS

Para el número de Reynolds se utilizaran las ecuaciones que a continuación se mencionan:

Número de Reynolds total<sup>[15,17]</sup>:

$$\text{Re} = \frac{D_h U_m \rho_m}{\mu_e}$$

---

Para el diámetro hidráulico de una corona, es decir, dos tubos concéntricos se tiene<sup>[10,17]</sup>:

$$D_h = D_{\text{pozo}} - D_{\text{tub}}$$

Número de Reynolds de la suspensión<sup>[18]</sup>:

$$\text{Re}_s = \frac{D_{hs} U_s \rho_s}{\mu_e}$$

Número de Reynolds de la cama<sup>[18]</sup>:

$$\text{Re}_B = \frac{D_{hB} U_B \rho_B}{\mu_e}$$

El diámetro hidráulico de la cama  $D_{hB}$  es:

$$D_{hB} = \frac{4A_{STB}}{S_{MB}}$$

Donde:

$A_{STB}$  Área de la sección transversal de la cama de recortes

$S_{MB}$  Perímetro mojado de la cama de recortes

### 6.2.3. FUERZA NORMAL Y FUERZA MÁXIMA DE LA CAMA DE RECORTES

La fuerza de contacto o fricción que actúa en el sistema en la zona de la cama es originada por el contacto entre la cama de recortes y la pared del pozo, esta depende del coeficiente de interacción entre los materiales involucrados. Su máximo valor, cuando la cama está a punto de moverse, es proporcional a la fuerza normal<sup>[1,2,12,14]</sup> impuesta sobre las paredes por la cama de recortes:

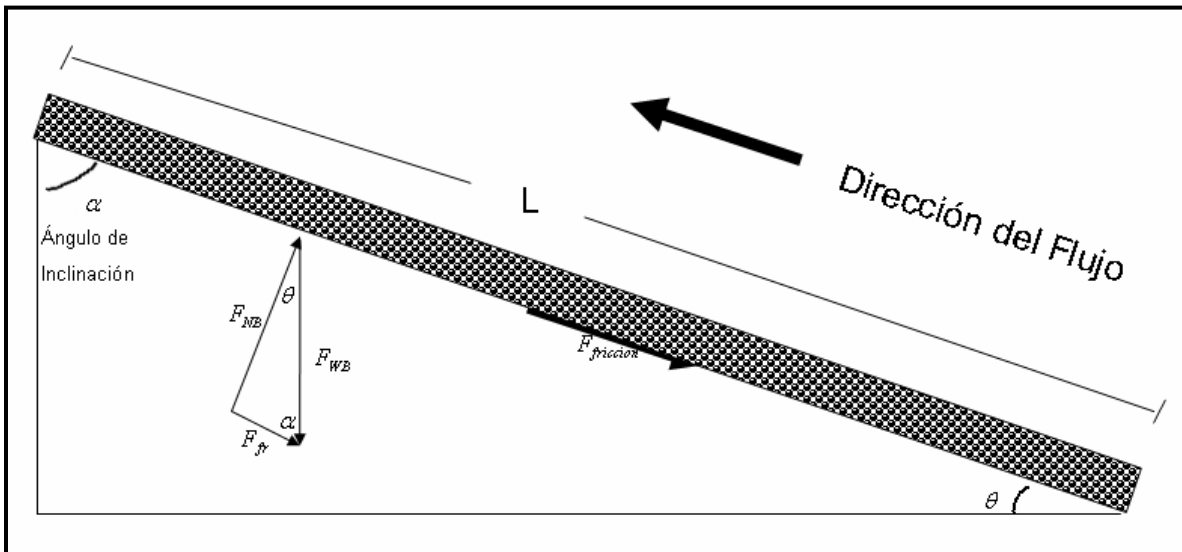
$$F_{Max} = \eta F_{NB}$$

Donde  $F_{Max}$  es la fuerza de fricción máxima también llamada fuerza de fricción hidrodinámica,  $F_{NB}$  es la fuerza normal de la cama de recortes y la constante de proporcionalidad  $\eta$  es llamada coeficiente de deslizamiento.

La fuerza  $F_{NB}$  tendrá dos componentes<sup>[19]</sup>, una fuerza de fricción en seco ( $F_{fr}$ ) la cual es ejercida por las partículas sobre la superficie de contacto entre la cama de recortes y la pared del agujero, por otro lado se tendrá la fuerza de fricción interfacial  $F_{f\phi}$  la cual se observará con el movimiento de la cama.

$$F_{NB} = F_{fr} + F_{f\phi}$$

La fuerza de fricción seca es determinada en base a la fuerza que ejercen las partículas de la cama de recortes, en base al ángulo  $\theta$ , como se puede observar en la **Figura 6.11**.



**Figura 6.11. Diagrama esquemático de la Fuerza normal de la cama de recortes.**

De forma general la función Seno es:

$$\text{Seno } \theta = \frac{\text{Cateto Opuesto}}{\text{Hipotenusa}}$$

Sustituyendo los lados del triángulo de la **Figura 6.11**.

$$\text{Seno } \theta = \frac{F_{fr}}{F_{WB}}$$

---

Despejando la fuerza de fricción en seco  $F_{fr}$

$$F_{fr} = F_{WB} \text{Sen} \theta$$

Por otro lado el peso de la cama de recortes es:

$$F_{WB} = V_B (\rho_r - \rho_L) g$$

El volumen de la cama es:

$$V_B = C_B A_B L$$

Finalmente la fuerza de fricción en seco<sup>[12]</sup> es:

$$F_{fr} = C_B A_B L (\rho_r - \rho_L) g \text{Sen} \theta$$

La fuerza de fricción interfacial<sup>[20]</sup>  $F_{f\phi}$  es debida a la transmisión del esfuerzo desde la interfase a través de la cama de partículas. Guillaume Amontón en 1699 propuso su ley de fricción la cual es una constante:

$$f = \tan \phi$$

$$\frac{N}{F_{f\phi}} = f$$

Sustituyendo  $f$

$$\frac{N}{F_{f\phi}} = \tan \phi$$

$$F_{f\phi} = \frac{N}{\tan \phi}$$

Donde  $F_{f\phi}$  es la fricción y también se le conoce como fuerza de corte friccionante; y la fuerza normal  $N$  o de carga se le denomina también presión,  $f$  es el coeficiente de fricción y  $\phi$  es el ángulo de corte friccionante, ángulo de fricción interna o ángulo de reposo.

En el caso de la interfase se tiene:  $F_{f\phi} = \frac{F_{Ni}}{\tan \phi}$

De la ecuación anterior la fuerza normal de la interfase  $F_{Ni}$  es generada por el área de la interfase y el esfuerzo cortante de la interfase (ver **Figura 6.12**), entonces:

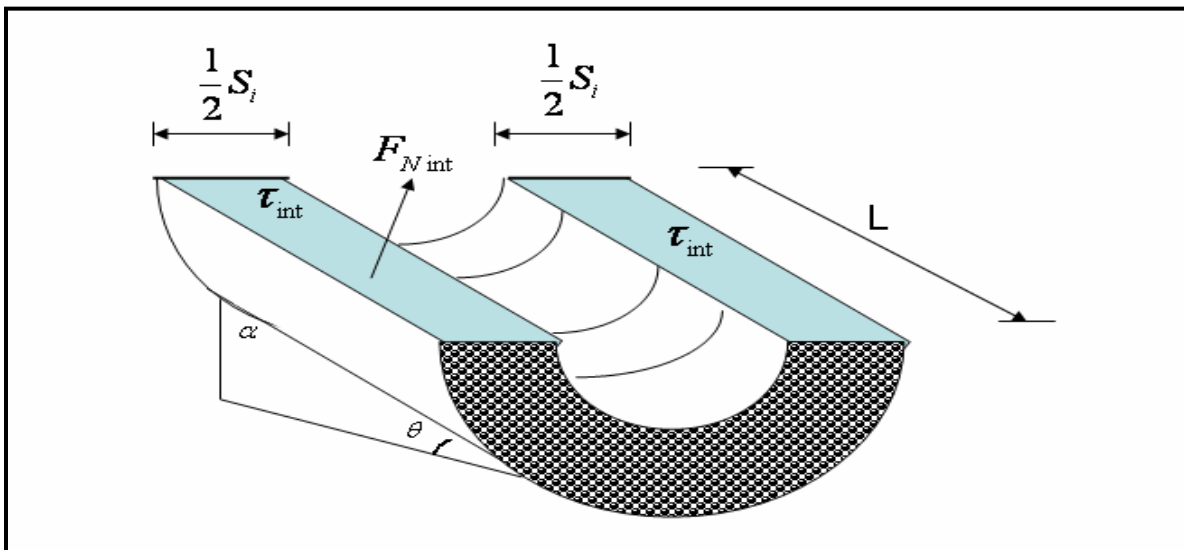
$$A_i = S_i L$$

$$F_{Ni} = \tau_i A_i$$

Finalmente

$$F_{Ni} = S_i \tau_i L$$

$$F_{f\phi} = \frac{S_i \tau_i L}{\tan \phi}$$



**Figura 6.12. Sección transversal de la cama de recortes.**

Bagnold<sup>[20]</sup> demostró que cuando existe un flujo de fluidos sobre un depósito de partículas sólidas, existe un esfuerzo normal en la interfase  $F_{f\phi B}$ , el cual es asociado con un esfuerzo cortante ejercido por el fluido sobre la cama. La relación es la siguiente:

---


$$F_{f\phi B} = \eta \frac{\tau_i S_i}{\tan \phi} L$$

La ecuación anterior es la resultante de sustituir  $F_{Ni}$  y multiplicarlo por el coeficiente de resbalamiento  $\eta$  <sup>[1]</sup>.

$\eta$  es el coeficiente de resbalamiento para un sólido proporcionado. Los valores de  $\tan \phi$  están en un rango de 0.35 a 0.75, dependiendo del tipo de flujo y características de la partícula <sup>[19]</sup>. Se utilizarán los valores de  $\eta = 0.15$  y  $\tan \phi = 0.6$  ya que son los valores recomendados por Martins <sup>[19]</sup>.

Sustituyendo las fuerzas en la fuerza normal de la cama de recortes:

$$F_{NB} = C_B A_B L (\rho_r - \rho_L) g \text{Sen} \alpha + \frac{\tau_i S_i}{\tan \phi} L$$

Pero  $F_{Max} = \eta F_{NB}$

Entonces la fuerza máxima de la cama de recortes <sup>[1,9,20]</sup> será:

$$F_{Max} = \eta \left[ C_B A_B L (\rho_r - \rho_L) g \text{Sen} \alpha + \frac{\tau_i S_i}{\tan \phi} L \right]$$

Despejando  $L$

$$F_{Max} = \eta \left[ C_B A_B (\rho_r - \rho_L) g \text{Sen} \alpha + \frac{\tau_i S_i}{\tan \phi} \right] L$$

Finalmente

$$\frac{F_{Max}}{L} = 0.15 \left[ C_B A_B (\rho_r - \rho_L) g \text{Sen} \alpha + \frac{\tau_i S_i}{0.6} \right]$$

---

### 6.3. ECUACION DE CONCENTRACIONES

Para predecir la concentración de sólidos en la capa superior, se partirá de la ecuación para la concentración en coordenadas rectangulares de la tabla de especies de conservación para una mezcla binaria o pseudobinaria <sup>[22]</sup> ya que se tiene una difusión turbulenta en la concentración.

$$C_j = C_j(x, y, z, t)$$

$$\frac{\partial C_j}{\partial t} + v_x \frac{\partial C_j}{\partial x} + v_y \frac{\partial C_j}{\partial y} + v_z \frac{\partial C_j}{\partial z} = D_i \left[ \frac{\partial^2 C_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_j}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_j}{\partial z^2} \right] + R_{vj}$$

Se asume que  $\rho$  y  $D_j$  son constantes y que  $D_j$  es la difusividad binaria.

En este caso, se analiza el problema en régimen constante, por ello  $t=0$  y debido a que la concentración solo varía en la dirección de flujo y solo esta dirección se tomará en cuenta, por lo tanto la derivada con respecto a  $X$  y a  $Z$  será igual a cero. Además no existe reacción química <sup>[22]</sup> por ello  $R_{vj} = 0$ .

La ecuación de concentración se convierte en la ecuación de conservación en una sola dimensión <sup>[2,3,9,23]</sup> en estado constante con  $C_j = C_j(y)$

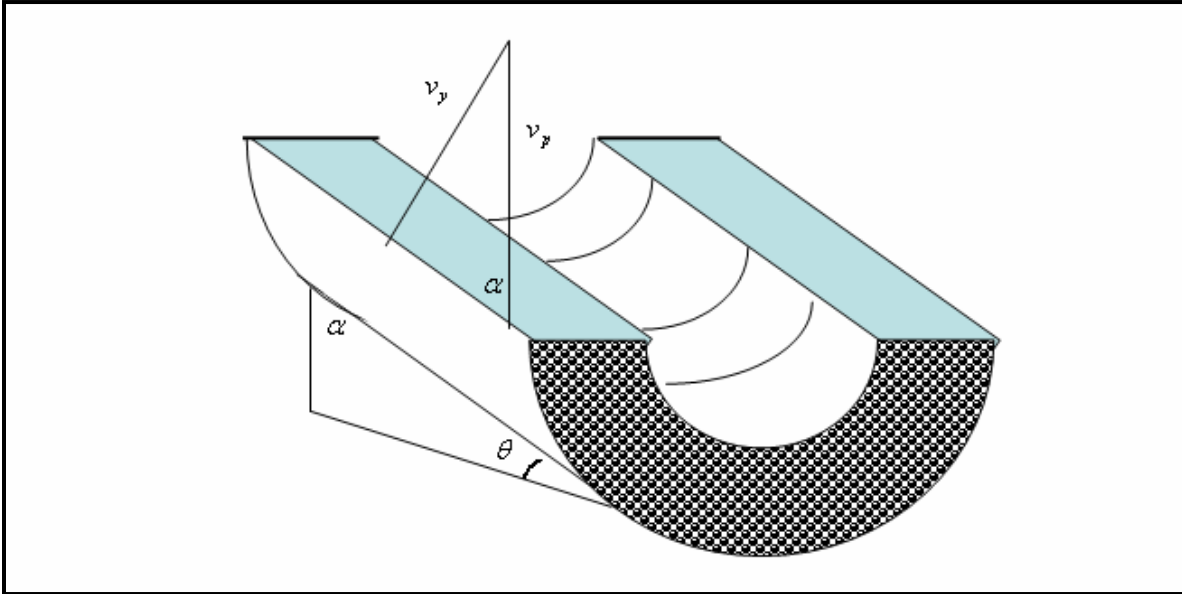
$$v_y \frac{\partial C_j}{\partial y} = D_i \left[ \frac{\partial^2 C_j}{\partial y^2} \right]$$

Igualando a cero se tiene e igualando  $D_i$  con  $\varepsilon_p$  se tiene:

$$\varepsilon_p \frac{d^2 C}{dy^2} + v_y \frac{dC}{dy} = 0$$

Donde  $\varepsilon_p$  es el coeficiente de difusión de la partícula y  $v_p$  es la velocidad de la partícula en la dirección  $Y$ , ver **Figura 6.13**. La ecuación anterior también es conocida con el nombre de ecuación de Pland. Donde la variable  $C$  es la concentración de volumen local de partículas.





**Figura 6.13. Sección transversal donde aparece la velocidad de asentamiento.**

Como  $v_y$  es la componente en la dirección “y” de la velocidad de asentamiento de una partícula en el lodo estancado, así también en las partículas agrupadas, por ello<sup>19</sup>:

$$\text{Sen } \alpha = \frac{v_y}{v_p}$$

Entonces

$$v_y = v_p \text{Sen } \alpha$$

Finalmente

$$\varepsilon_p \frac{d^2 C}{dy^2} + v_p \text{Sen } \alpha \frac{dC}{dy} = 0$$

Para calcular la velocidad de la partícula  $v_y$  se hace en función de la velocidad de asentamiento  $v_s$  (se utilizará la correlación de Chien<sup>[6]</sup>), multiplicada por un exponencial elevado a la concentración de la suspensión.

$$v_p = v_s e^{-5.9C_s}$$

---

Para el coeficiente de difusión de la partícula, se utilizará la ecuación presentada por Walton <sup>[3,11]</sup>

$$\varepsilon_p = 0.014\varepsilon_0 d_r U_s \text{Re}_s^{1/3}$$

Donde

$$\varepsilon_0 = \left( \frac{C_s}{0.12} \right)^{0.25} \quad \text{si } C_s > 0.05$$

$$\varepsilon_0 = 1.24 \left( \frac{C_s}{0.12} \right)^{0.5} \quad \text{si } C_s \leq 0.05$$

En operaciones de perforación de pozos petroleros generalmente las concentraciones son menores al 5%, por ello se utilizará la última correlación de  $\varepsilon_0$ .

### 6.3.1. SOLUCIÓN PROPUESTA PARA LA ECUACIÓN DE CONCENTRACIONES

Dividiendo por  $\varepsilon_p$  el resultado es <sup>[11]</sup>:

$$\frac{d^2 C}{dy^2} + \frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p} \frac{dC}{dy} = 0$$

Formando la ecuación auxiliar o ecuación característica de la ecuación diferencial:

$$m^2 + \frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p} m = 0, \quad \Rightarrow \quad m_1 = 0$$

$$m + \frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p} = 0, \quad \Rightarrow \quad m_2 = -\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}$$

La ecuación diferencial es de la forma Tipo 1, tiene dos raíces reales distintas<sup>[24]</sup>, por lo tanto:

$$C = A + B * e^{-\frac{v_p Sen \alpha}{\varepsilon_p} y}$$

La condición Inicial de Frontera 1 es C.F.1  $\Rightarrow C = 0 \quad y = r_{ext}$

Esta condición de frontera toma en cuenta que la concentración será cero en la parte superior del agujero, y tendremos la componente de “Y” positiva igual al radio exterior del espacio anular o radio del agujero. En ese punto invariablemente vamos a tener otro número que no sea cero porcentaje de concentración sólidos en la suspensión. El origen se toma en el centro de la tubería.

Sustituyendo las Condición de Frontera 1:

$$0 = A + B * e^{-\left[\frac{v_p Sen \alpha}{\varepsilon_p}\right] r_{ext}}$$

Despejando A:

$$A = -B * e^{-\left[\frac{v_p Sen \alpha}{\varepsilon_p}\right] r_{ext}}$$

$$C = -B * e^{-\left[\frac{v_p Sen \alpha}{\varepsilon_p}\right] r_{ext}} + B * e^{-\left[\frac{v_p Sen \alpha}{\varepsilon_p}\right] y}$$

Se toma a B como común múltiplo:

$$C = B \left[ e^{-\left[\frac{v_p Sen \alpha}{\varepsilon_p}\right] y} - e^{-\left[\frac{v_p Sen \alpha}{\varepsilon_p}\right] r_{ext}} \right]$$

La condición de Frontera 2:

$$C.F.2 \Rightarrow C = C_B, \quad y = -r_{ext} + h_B$$

Es decir, la concentración en la interfase del área de la suspensión y de la cama va a ser igual al área de la cama, esto es debido a que en la cama en toda su área la concentración será de 0.52 por que va a ser la forma en que se van a acomodar las partículas esféricas. La posición de la interfase será la altura de la cama de recortes, y como el origen se encuentra en el centro de tubería de perforación y el agujero (son círculos concéntricos), el valor que se busca será menos el radio exterior mas la altura de la cama de recortes.

$$C_B = B \left[ e^{-\left[ \frac{v_p S \epsilon \alpha}{\epsilon_p} \right] (-r_{ext} + h_B)} - e^{-\left[ \frac{v_p S \epsilon \alpha}{\epsilon_p} \right] r_{ext}} \right]$$

Despejando  $B$

$$B = \frac{C_B}{\left[ e^{-\left[ \frac{v_p S \epsilon \alpha}{\epsilon_p} \right] (-r_{ext} + h_B)} - e^{-\left[ \frac{v_p S \epsilon \alpha}{\epsilon_p} \right] r_{ext}} \right]}$$

Finalmente la ecuación propuesta para la concentración del modelo es:

$$C(y) = \frac{C_{cama} \left[ e^{-\left[ \frac{v_p S \epsilon \alpha}{\epsilon_p} \right] y} - e^{-\left[ \frac{v_p S \epsilon \alpha}{\epsilon_p} \right] r_{ext}} \right]}{\left[ e^{-\left[ \frac{v_p S \epsilon \alpha}{\epsilon_p} \right] (-r_{ext} + h_B)} - e^{-\left[ \frac{v_p S \epsilon \alpha}{\epsilon_p} \right] r_{ext}} \right]}$$

#### 6.4. AREA DE LA SUSPENSIÓN

Se calculará el área de la suspensión, en todos los casos se tomará en cuenta que es una tubería centrada, debido a que en perforación de pozos se utilizan los estabilizadores para estabilizar la sarta pero al mismo tiempo estabilizan la tubería en la sección que van colocados y también se utilizan centradores (o centralizadores) de bajo torque para pozos horizontales. Se partirá de la fórmula general de una circunferencia con centro en el origen  $x^2 + y^2 = r^2$ , en el caso de la tubería de perforación se tendrá  $x = \sqrt{r_{int}^2 - y^2}$  y para el agujero de perforación  $x = \sqrt{r_{ext}^2 - y^2}$ .

Debido a un análisis de áreas que se consideró, existirán 3 casos para la región de la suspensión. Se dividirán en Caso I, Caso II y caso III. En el Caso I la cama de recortes estará en la parte inferior del espacio anular, esto limita a la altura de la cama de recortes máximo a alcanzar la diferencia de diámetros, en el Caso II la altura de la cama de recortes va a ir en el centro del espacio anular, es decir, desde menos el radio interior hasta el radio interior positivo, este es el único caso que se divide en dos secciones, Caso I-a y Caso I-b debido a que al pasar por el origen, por las funciones trigonométricas existe un cambio en los ángulos que se tiene que señalar, y para el Caso III la cama de recortes llegará hasta la parte superior del espacio anular. Para ilustrar mejor estos diferentes Casos se describen a continuación.

#### 6.4.1. AREA DE LA SUSPENSION CASO I

La altura de la cama de recortes está en la parte baja, en donde se ven afectadas las dos circunferencias, pero la circunferencia central en su totalidad.

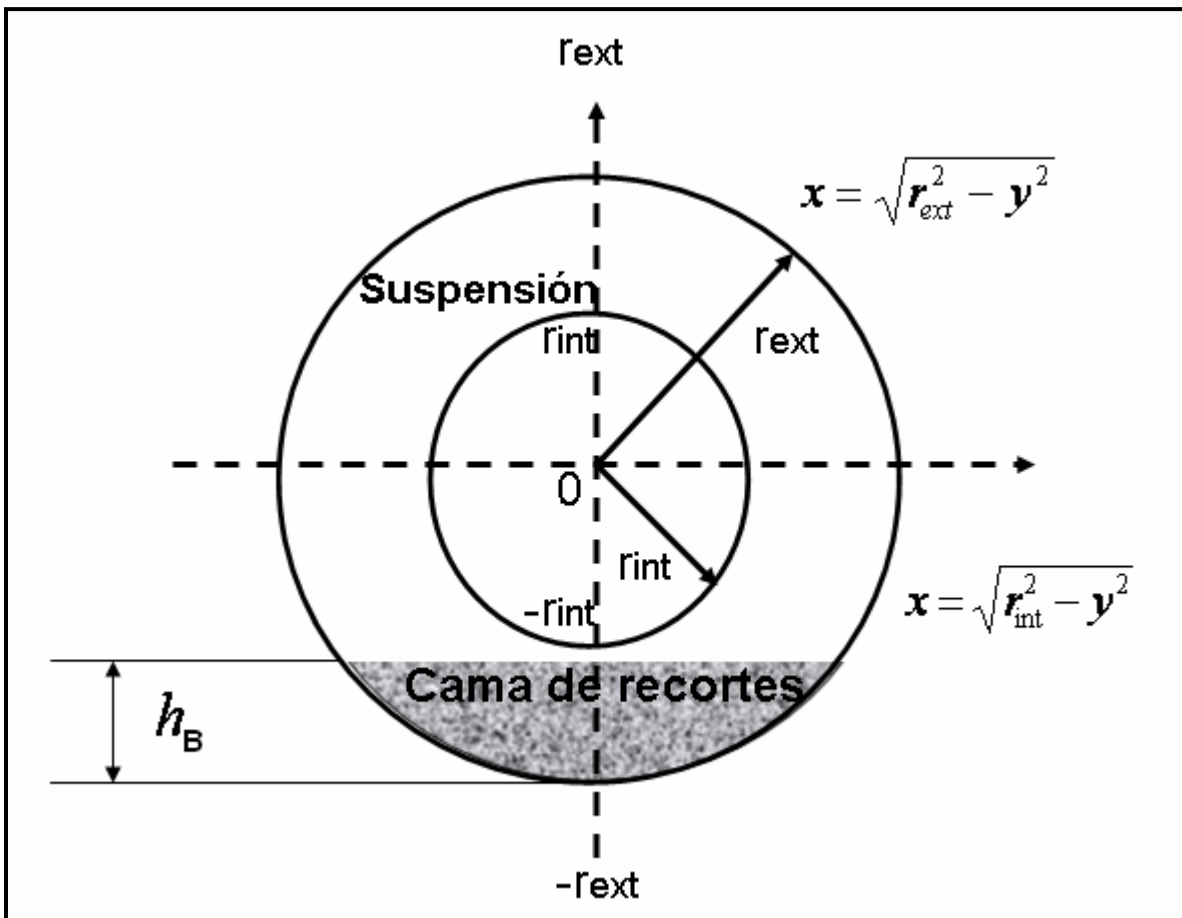


Figura 6.14. Cama de recortes en la parte baja del pozo de perforación.

Este caso ocurrirá cuando se tenga  $h_B < (r_{ext} - r_{int})$ . El área de una circunferencia

es  $A = 2 \int_{-r}^r \sqrt{r^2 - y^2} dy$ , por simetría se tiene una mitad del área de la circunferencia

y se tiene que multiplicar por 2, para la integral se toma el método de rebanadas, es decir, la integral va integrando cada rebanada del área bajo la curva<sup>[26,27]</sup>. En este caso se tendrá la integral de la siguiente forma:

$$A_S = 2 \int_{-r_{ext}+h_{cama}}^{r_{ext}} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} dy - 2 \int_{-r_{int}}^{r_{int}} \sqrt{r_{int}^2 - y^2} dy$$

$$A_S = 2 \left\{ \frac{y}{2} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} + \frac{r_{ext}^2}{2} \operatorname{sen}^{-1} \left( \frac{y}{r_{ext}} \right) \right\} \Big|_{-r_{ext}+h_B}^{r_{ext}} - 2 \left\{ \frac{y}{2} \sqrt{r_{int}^2 - y^2} + \frac{r_{int}^2}{2} \operatorname{sen}^{-1} \left( \frac{y}{r_{int}} \right) \right\} \Big|_{-r_{int}}^{r_{int}}$$

$$A_S = -(h_B - r_{ext}) \sqrt{r_{ext}^2 - (h_B - r_{ext})^2} + r_{ext}^2 \left( \frac{\pi}{2} \right) - r_{ext}^2 \operatorname{sen}^{-1} \left( \frac{h - r_{ext}}{r_{ext}} \right) - \pi r_{int}^2$$

$$A_S = \left( \frac{\pi}{2} \right) r_{ext}^2 - (h_B - r_{ext}) \sqrt{2hr_{ext} - h_B^2} - r_{ext}^2 \operatorname{sen}^{-1} \left( \frac{h_B}{r_{ext}} - 1 \right) - \pi r_{int}^2$$

$$A_S = r_{ext}^2 \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) - \operatorname{sen}^{-1} \left( \frac{h_B}{r_{ext}} - 1 \right) \right] - (h_B - r_{ext}) \sqrt{2h_B r_{ext} - h_B^2} - \pi r_{int}^2$$

#### 6.4.2. AREA DE LA SUSPENSION CASO II

La altura de la cama de recortes está en la parte central de las circunferencias y se ven afectadas las dos circunferencias en forma parcial.

Si  $h_B > (r_{ext} - r_{int})$  y  $h_B < (r_{ext} - r_{int})$

$$A_S = 2 \int_{-r_{ext}+h}^{r_{ext}} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} dy - 2 \int_{-r_{ext}+h}^{r_{int}} \sqrt{r_{int}^2 - y^2} dy$$

$$A_S = 2 \left\{ \frac{y}{2} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} + \frac{r_{ext}^2}{2} \operatorname{sen}^{-1} \left( \frac{y}{r_{ext}} \right) \right\} \Big|_{-r_{ext}+h_B}^{r_{ext}} - 2 \left\{ \frac{y}{2} \sqrt{r_{int}^2 - y^2} + \frac{r_{int}^2}{2} \operatorname{sen}^{-1} \left( \frac{y}{r_{int}} \right) \right\} \Big|_{-r_{ext}+h_B}^{r_{int}}$$

$$A_S = -(h_{cama} - r_{ext}) \left[ \sqrt{2h_{cama}r_{ext} - h_{cama}^2} + \sqrt{r_{int}^2 - (h_{cama} - r_{ext})^2} \right] + r_{ext}^2 \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) - \text{sen}^{-1} \left( \frac{h_{cama} - r_{ext}}{r_{ext}} \right) \right]$$

$$+ r_{int}^2 \left[ \text{sen}^{-1} \left( \frac{h_{cama} + r_{ext}}{r_{int}} \right) - \frac{\pi}{2} \right]$$

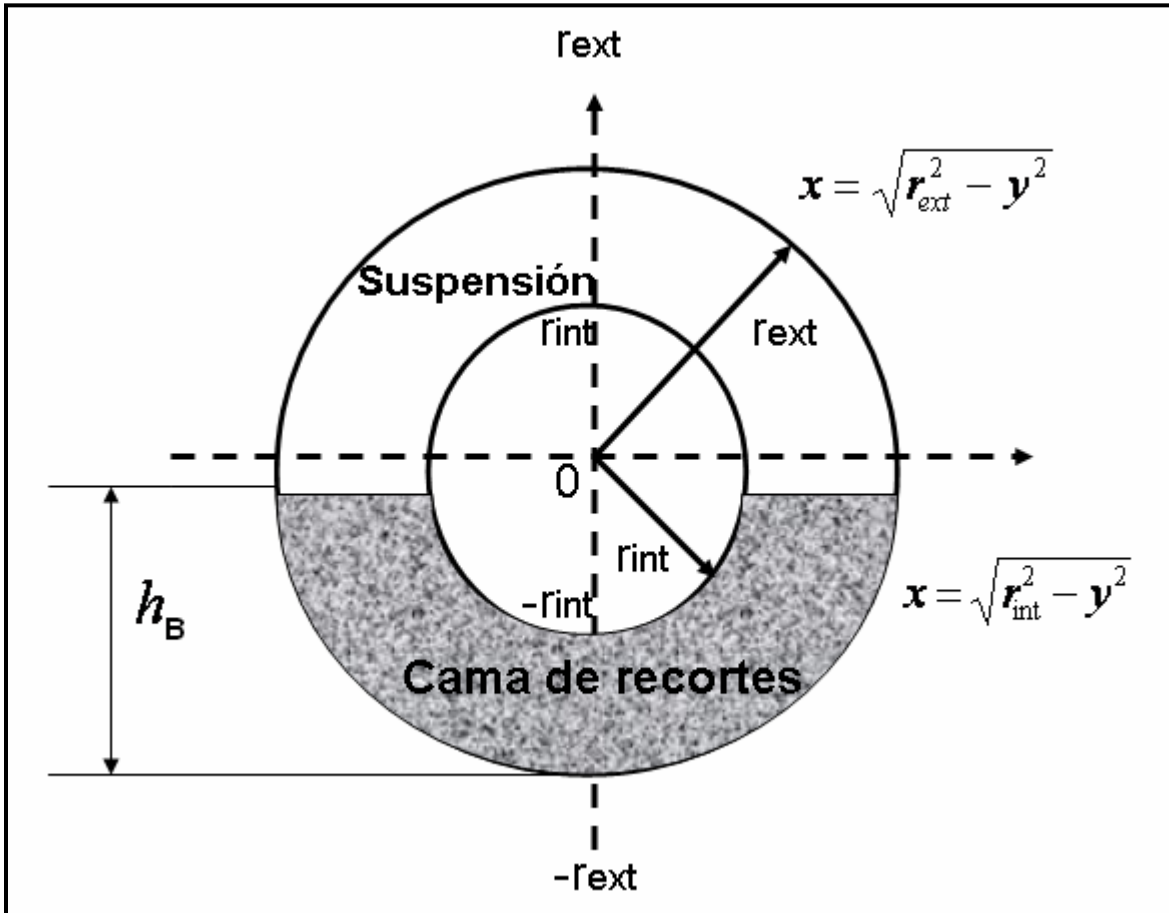


Figura 6.15. Cama de recortes en la parte media del pozo de perforación.

### 6.4.3. AREA DE LA SUSPENSIÓN CASO III

La altura de la cama de recortes está en la parte superior (o alta) del espacio anular entre el agujero descubierto y la tubería de perforación. Se ve afectada la circunferencia interior en su totalidad y parcialmente la circunferencia exterior.

Si  $h_B \geq (r_{ext} + r_{int})$

$$A_S = 2 \int_{-r_{ext}+h_B}^{r_{ext}} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} dy$$

$$A_S = 2 \left\{ \frac{y}{2} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} + \frac{r_{ext}^2}{2} \operatorname{sen}^{-1} \left( \frac{y}{r_{ext}} \right) \right\} \Big|_{h_B - r_{ext}}^{r_{ext}}$$

$$A_S = -(h_B - r_{ext}) \sqrt{r_{ext}^2 - (h_B - r_{ext})^2} + r_{ext}^2 \left( \frac{\pi}{2} \right) - r_{ext}^2 \operatorname{sen}^{-1} \left( \frac{h_B - r_{ext}}{r_{ext}} \right)$$

$$A_S = \left( \frac{\pi}{2} \right) r_{ext}^2 - (h_B - r_{ext}) \sqrt{2h_B r_{ext} - h_B^2} - r_{ext}^2 \operatorname{sen}^{-1} \left( \frac{h_B}{r_{ext}} - 1 \right)$$

$$A_S = r_{ext}^2 \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) - \operatorname{sen}^{-1} \left( \frac{h_B}{r_{ext}} - 1 \right) \right] - (h_B - r_{ext}) \sqrt{2h_B r_{ext} - h_B^2}$$

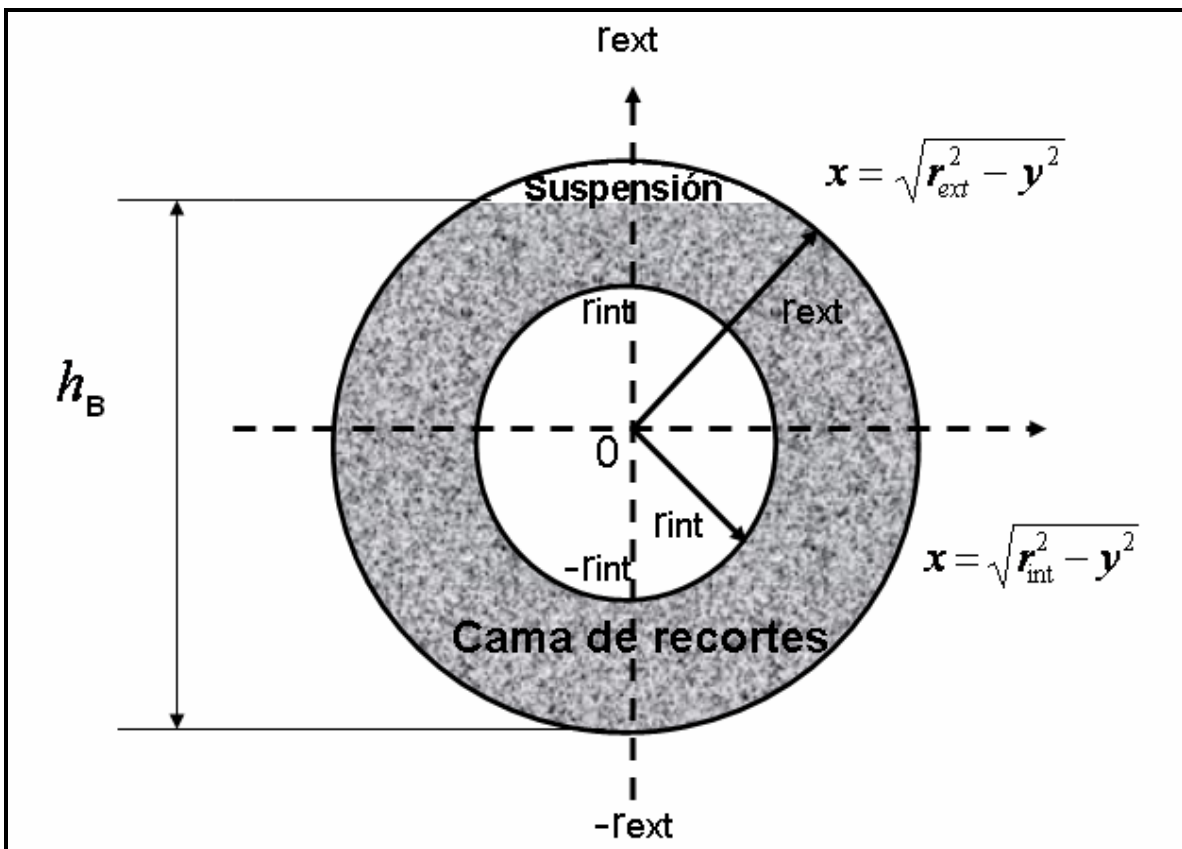


Figura 6.16. Suspensión de recortes en la parte alta del pozo de perforación.



## 6.5. CALCULO DE LOS PERIMETROS DE LA CAMA DE RECORTES, DE LA SUSPENSIÓN Y DE LA INTERFASE

Los perímetros estarán divididos también en las tres regiones en donde se encuentre la cama de recortes, es decir caso I, caso II y caso III, a continuación se desglosan cada uno de ellos.

El perímetro total es<sup>[25]</sup>:

$$S_T = 2\pi(r_{ext} + r_{int})$$

$$S_T = S_B + S_S$$

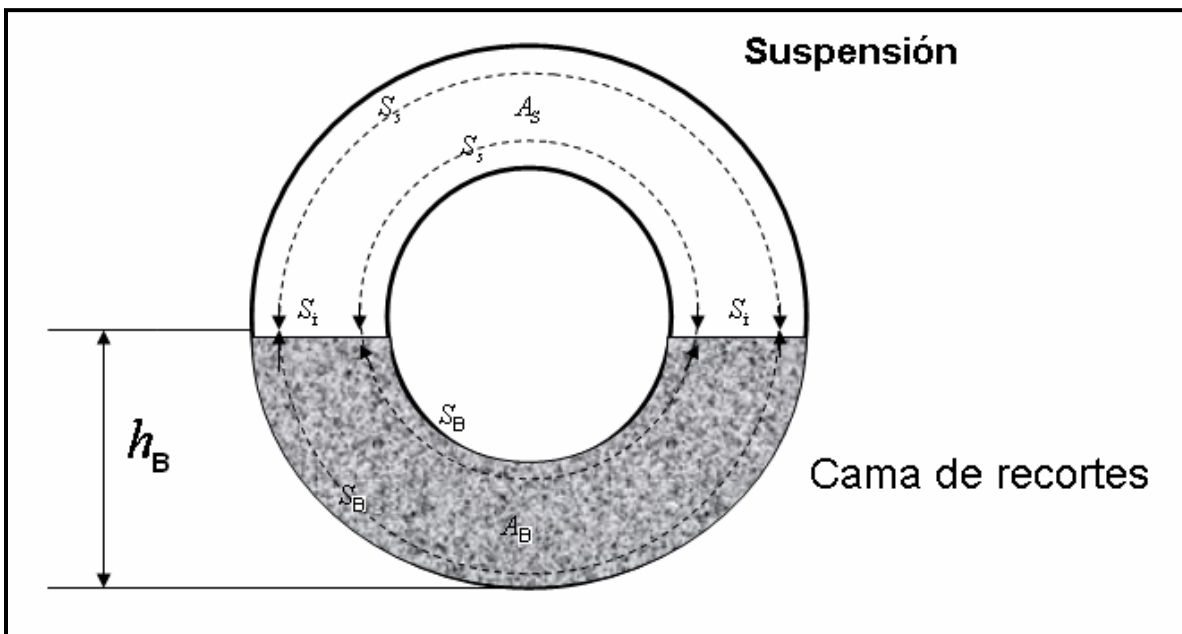


Figura 6.17. Perímetros en la sección transversal.

### 6.5.1. PERIMETROS CASO I

De forma general la función Coseno se tiene:

$$\text{Cos } \theta_1 = \frac{\text{Cateto Adyacente}}{\text{Hipotenusa}}$$

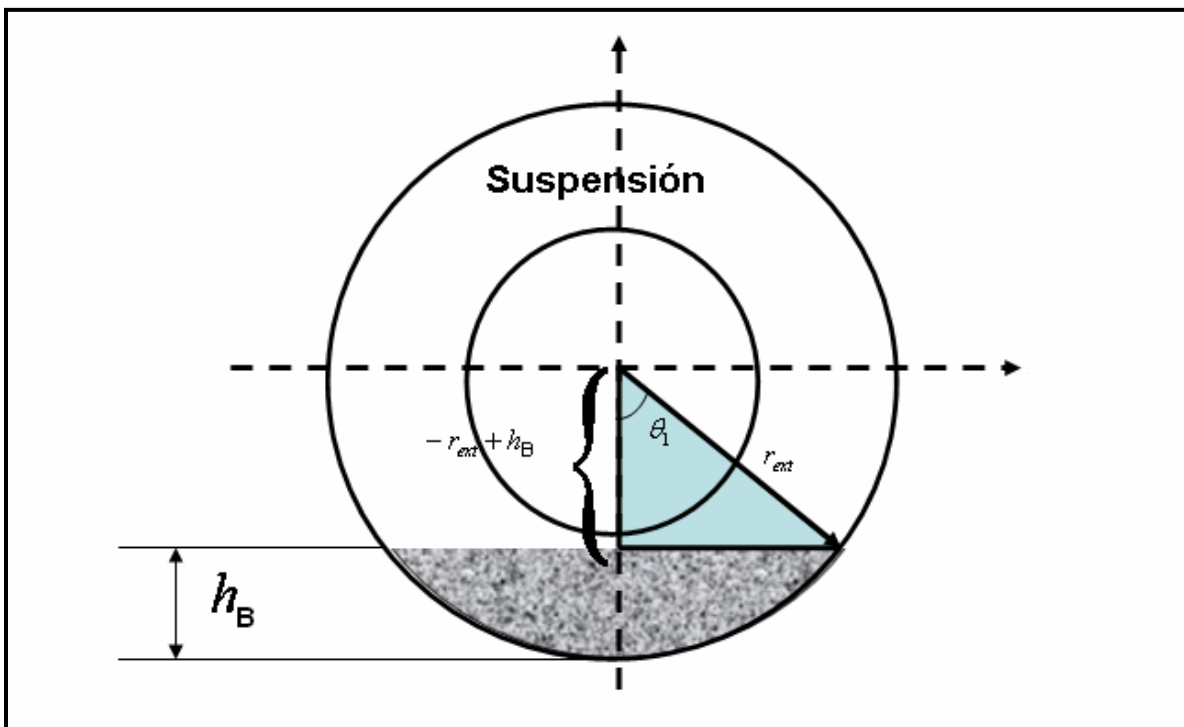
$$\text{Cos } \theta_1 = \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{ext}}$$

$$\theta_1 = \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{ext}} \right|$$

$$\theta_2 = 2 * \theta_1$$

Pero  $\theta_2$  esta en radianes por ello:

$$\theta_2 = \frac{2 * \pi * \theta_1}{180}$$



**Figura 6.18. Perímetros Caso I.**

De la Longitud de arco <sup>[26]</sup>,  $S = r\theta$

El perímetro de la cama de recortes es:

$$S_B = r_{ext} \left[ \frac{\pi}{90} \right] \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{ext}} \right|$$

---

El perímetro de la suspensión es:

$$S_s = 2\pi(r_{ext} + r_{int}) - r_{ext} \left[ \frac{\pi}{90} \right] \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{ext}} \right|$$

Para el perímetro de la interfase  $S_i$  se tiene:

$$\text{Sen} \theta_1 = \frac{\text{Cateto Opuesto}}{H}$$

Sustituyendo los lados del triángulo:

$$\text{Sen} \theta_1 = \frac{X}{r_{ext}}$$

Despejando  $X$  :

$$X = r_{ext} \left[ \frac{\pi}{180} \right] \text{Sen} \theta_1$$

Finalmente:

$$S_i = \frac{\pi}{90} r_{ext} \text{Sen} \theta_1$$

### 6.5.2. PERIMETROS CASO II

Este caso se dividirá en Caso I-a y Caso I-b, esto por que al pasar la altura de la cama por cero grados cambia el signo del ángulo y dependerá si la cama de recortes esta sobre los cuadrantes inferiores o cuadrantes superiores del espacio anular. En ambos casos se tendrán dos secciones de perímetro, el interior y el exterior.

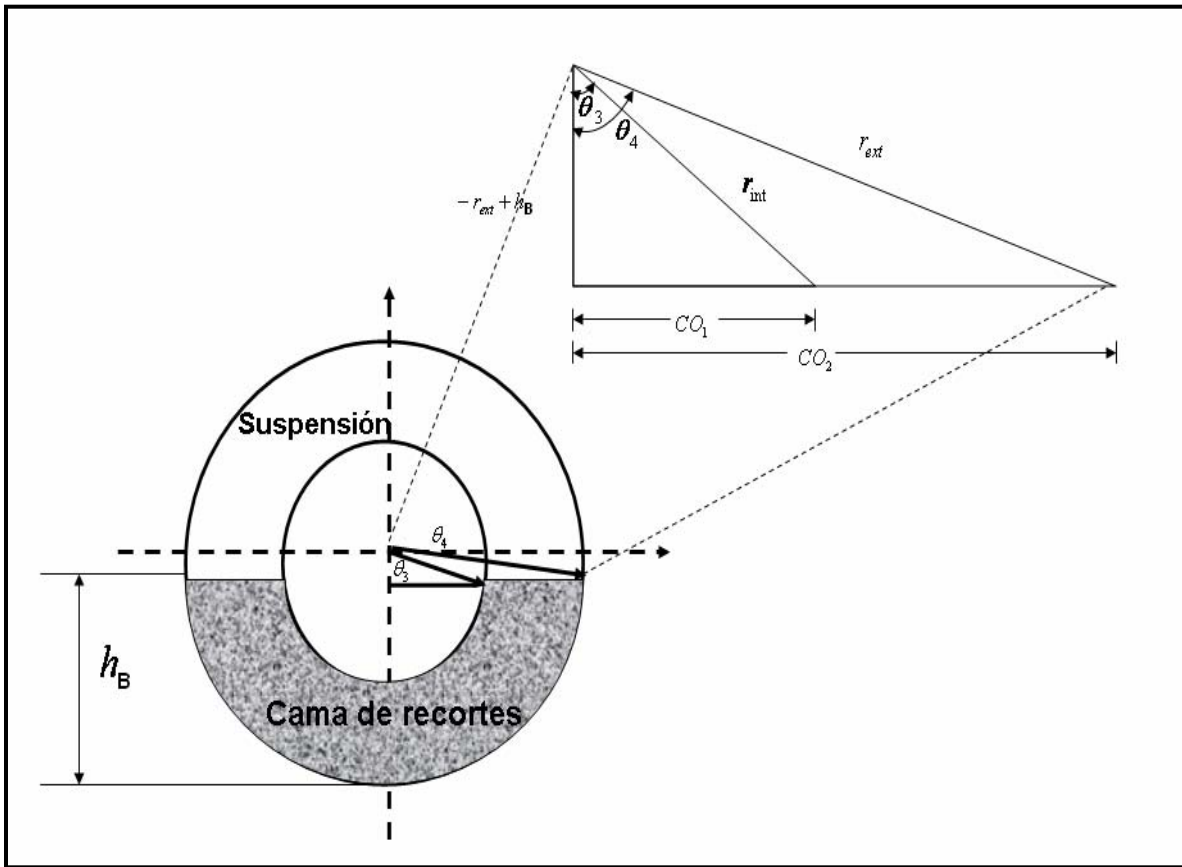


Figura 6.19. Perímetros caso II.

### CASO II-a. CUADRANTES INFERIORES

Si  $-r_{ext} + h \leq 0$  entonces:

$$\theta_3 = \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{int}} \right|$$

$$\theta_4 = \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{ext}} \right|$$

Longitud de arco  $S = r\theta$

$$S_{B1} = \frac{\pi}{90} r_{int} \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{int}} \right|$$

$$S_{B1} = \frac{\pi}{90} r_{ext} \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{ext}} \right|$$

$$S_B = \frac{\pi}{90} r_{int} \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{int}} \right| + \frac{\pi}{90} r_{ext} \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{ext}} \right|$$

$$S_S = 2\pi(r_{ext} + r_{int}) - \frac{\pi}{90} \left[ r_{int} \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{int}} \right| + r_{ext} \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{ext}} \right| \right]$$

Calculando los catetos opuestos y el perímetro de la interfase  $S_i$

$$\text{Sen}\theta = \frac{\text{CatetoOpuesto}}{\text{Hipotenusa}}$$

$$CO_1 = r_{int} \text{Sen}\theta_3$$

$$CO_2 = r_{ext} \text{Sen}\theta_4$$

$$S_i = 2[CO_2 - CO_1]$$

$$S_i = 2[r_{ext} \text{Sen}\theta_4 - r_{int} \text{Sen}\theta_3]$$

## CASO II-b. CUADRANTES SUPERIORES

Si  $-r_{ext} + h > 0$  entonces:

$$\theta_3 = 180 - \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{int}} \right|$$

$$\theta_4 = 180 - \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{ext}} \right|$$

Longitud de arco  $S = r\theta$  <sup>[27]</sup>

$$S_{B1} = \frac{\pi}{90} r_{int} * \left[ 180 - \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{int}} \right| \right]$$

$$S_{B1} = \frac{\pi}{90} * r_{ext} * \left[ 180 - \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{ext}} \right| \right]$$

$$S_B = \frac{\pi}{90} r_{int} \left[ 180 - \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{int}} \right| \right] + \frac{\pi}{90} r_{ext} \left[ 180 - \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{ext}} \right| \right]$$

$$S_S = 2\pi(r_{ext} + r_{int}) - \frac{\pi}{90} \left[ r_{int} \left( 180 - \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{int}} \right| \right) + r_{ext} \left( 180 - \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{ext}} \right| \right) \right]$$

Calculando los catetos opuestos y el perímetro de la interfase.

$$\text{Sen}\theta = \frac{\text{CatetoOpuesto}}{\text{Hipotenusa}}$$

$$CO_1 = r_{int} \text{Sen}\theta_{3a}$$

$$CO_2 = r_{ext} \text{Sen}\theta_{4a}$$

$$\theta_3 = \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{int}} \right|$$

$$\theta_4 = \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{ext}} \right|$$

$$S_i = 2[CO_2 - CO_1]$$

$$S_i = 2[r_{ext} \text{Sen}\theta_{4a} - r_{int} \text{Sen}\theta_{3a}]$$

$$S_i = 2 \left[ r_{ext} \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{ext}} \right| - r_{int} \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{int}} \right| \right]$$

### 6.5.3. PERIMETROS CASO III

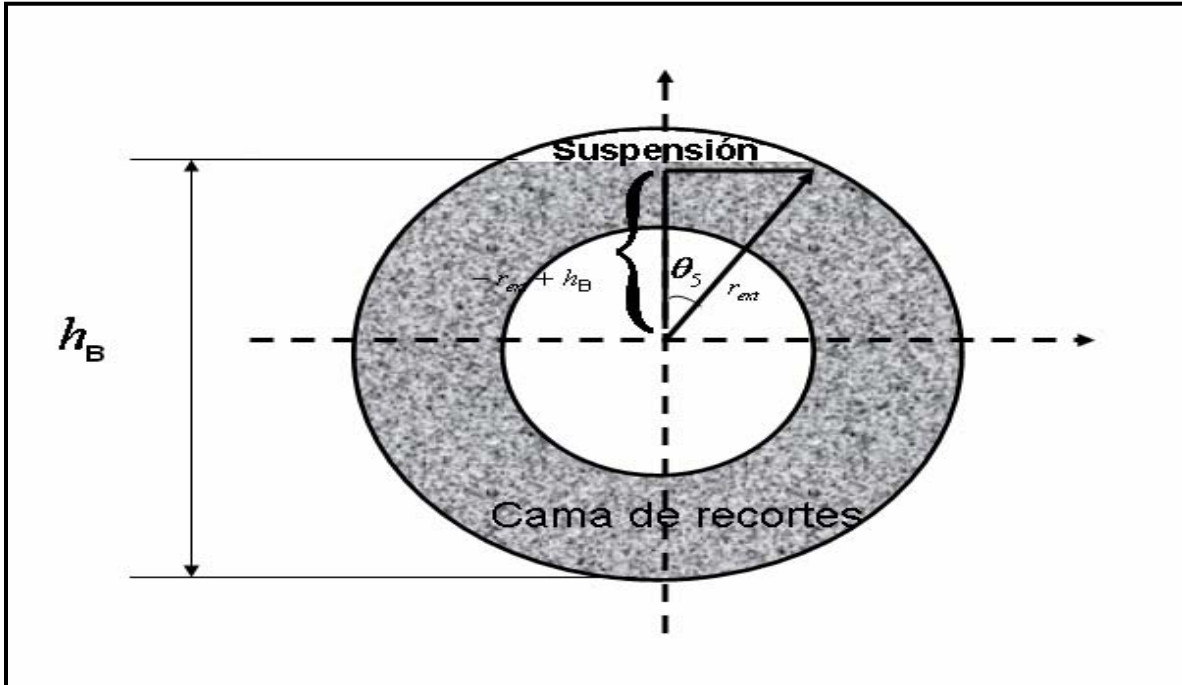


Figura 6.20. Perímetros caso III.

De forma general para la función Coseno se tiene:

$$\cos \theta_5 = \frac{\text{Cateto Adyacente}}{\text{Hipotenusa}}$$

Para el ángulo  $\theta_5$

$$\theta_5 = \cos^{-1} \left( \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{ext}} \right)$$

$$S_s = \frac{\pi}{90} r_{ext} \cos^{-1} \left( \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{ext}} \right)$$

$$S_B = 2\pi(r_{ext} + r_{int}) - \frac{\pi}{90} r_{ext} \cos^{-1} \left( \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{ext}} \right)$$

$$\text{Sen} \theta = \frac{\text{Cateto Opuesto}}{\text{Hipotenusa}}$$

---


$$CO = r_{ext} Sen\theta_5$$

$$S_i = 2r_{ext} Sen\theta_5$$

$$S_i = \frac{\pi}{90} r_{ext} Sen \left[ Cos^{-1} \left( \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{ext}} \right) \right]$$

## 6.6. CONCENTRACIÓN DE LA SUSPENSIÓN

En el caso de la concentración de la suspensión se realizará un promedio integral, es decir, se integrará en función de la concentración y del área de la suspensión, dividiendo entre el área total de la suspensión, por lo tanto, debido a que se tienen 3 casos de áreas, se procederá a calcular la concentración para cada caso.

### 6.6.1. CONCENTRACION DE LA SUSPENSIÓN CASO I

Realizando un promedio integral<sup>[18]</sup>,  $C_S A_S = \int C_j(y) A_j dy$

$$C_S = \frac{\int C_j A_j dy}{A_{TS}}$$

Donde

$C_j$  j-ésimo término de la concentración de la suspensión

$A_j$  j-ésimo término del área de la suspensión

$A_{TS}$  Área total de la suspensión

Por un lado:

$$C(y) = \frac{C_B \left[ e^{-\left[ \frac{v_p Sen\alpha}{\varepsilon_p} \right] y} - e^{-\left[ \frac{v_p Sen\alpha}{\varepsilon_p} \right] r_{ext}} \right]}{\left[ e^{-\left[ \frac{v_p Sen\alpha}{\varepsilon_p} \right] (-r_{ext} + h_B)} - e^{-\left[ \frac{v_p Sen\alpha}{\varepsilon_p} \right] r_{ext}} \right]}$$



Por otro lado:

$$A_S = 2 \int_{-r_{ext}+h_B}^{r_{ext}} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} dy - 2 \int_{-r_{int}}^{r_{int}} \sqrt{r_{int}^2 - y^2} dy$$

$$A_S = r_{ext}^2 \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) - \text{sen}^{-1} \left( \frac{h_B}{r_{ext}} - 1 \right) \right] - (h_B - r_{ext}) \sqrt{2h_B r_{ext} - h_B^2} - \pi r_{int}^2$$

Finalmente:

$$C_S = \frac{\left[ 2 \int_{-r_{ext}+h_{cam}}^{r_{ext}} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} dy - 2 \int_{-r_{int}}^{r_{int}} \sqrt{r_{int}^2 - y^2} dy \right] * \frac{C_B \left[ e^{-\left[ \frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p} \right] y} - e^{-\left[ \frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p} \right] r_{ext}} \right]}{\left[ e^{-\left[ \frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p} \right] (-r_{ext}+h_B)} - e^{-\left[ \frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p} \right] r_{ext}} \right]}}{r_{ext}^2 \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) - \text{sen}^{-1} \left( \frac{h_B}{r_{ext}} - 1 \right) \right] - (h_B - r_{ext}) \sqrt{2h_B r_{ext} - h_B^2} - \pi r_{int}^2} \quad (6.5)$$

La ecuación **(6.5)** ( $C_S$ ) es la quinta ecuación del sistema de cinco ecuaciones con cinco incógnitas que se propone.

Para simplificar la integral

$$\lambda = e^{-\left[ \frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p} \right] r_{ext}}$$

$$\kappa = e^{-\left[ \frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p} \right] (-r_{ext}+h_B)} - e^{-\left[ \frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p} \right] r_{ext}}$$

$$C_S = \frac{\frac{2 * C_B}{[\kappa]} \left[ \int_{-r_{ext}+h_B}^{r_{ext}} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} \left[ e^{-\left[ \frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p} \right] y} - \lambda \right] dy \right] - \left[ \int_{-r_{int}}^{r_{int}} \sqrt{r_{int}^2 - y^2} \left[ e^{-\left[ \frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p} \right] y} - \lambda \right] dy \right]}{r_{ext}^2 \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) - \text{sen}^{-1} \left( \frac{h_B}{r_{ext}} - 1 \right) \right] - (h_B - r_{ext}) \sqrt{2h_B r_{ext} - h_B^2} - \pi r_{int}^2}$$

$$C_S = \frac{2 * C_B \left\{ \left[ \int_{-r_{ext}+h_B}^{r_{ext}} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} \left[ e^{-\left[ \frac{v_p Sen \alpha}{\varepsilon_p} \right] y} - \lambda \right] dy \right] - \left[ \int_{-r_{int}}^{r_{int}} \sqrt{r_{int}^2 - y^2} \left[ e^{-\left[ \frac{v_p Sen \alpha}{\varepsilon_p} \right] y} - \lambda \right] dy \right] \right\}}{\kappa * \left\{ r_{ext}^2 \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) - sen^{-1} \left( \frac{h_B}{r_{ext}} - 1 \right) \right] - (h_B - r_{ext}) \sqrt{2h_B r_{ext} - h_B^2 - \pi r_{int}^2} \right\}}$$

$$\begin{aligned} e^{-\frac{v_p Sen \alpha}{\varepsilon_p} r_{ext}} \int_{-r_{ext}+h_B}^{r_{ext}} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} dy &= \frac{y}{2} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} + \frac{r_{ext}^2}{2} Sen^{-1} \left( \frac{y}{r_{ext}} \right) \Big|_{-r_{ext}+h_B}^{r_{ext}} = \\ &= \frac{r_{ext}^2}{2} Sen^{-1}(1) - \left[ \frac{-r_{ext} + h_B}{2} \sqrt{r_{ext}^2 - (-r_{ext} + h_B)^2} + \frac{r_{ext}^2}{2} Sen^{-1} \left( \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{ext}} \right) \right] \\ &= \frac{\pi * r_{ext}^2}{4} - \left[ \frac{-r_{ext} + h_B}{2} \sqrt{2h_B r_{ext} - h_B^2} + \frac{r_{ext}^2}{2} Sen^{-1} \left( \frac{h_B - r_{ext}}{r_{ext}} \right) \right] \end{aligned}$$

$$e^{-\frac{v_p Sen \alpha}{\varepsilon_p} r_{ext}} \int_{-r_{int}}^{r_{int}} \sqrt{r_{int}^2 - y^2} dy = \frac{y}{2} \sqrt{r_{int}^2 - y^2} + \frac{r_{int}^2}{2} Sen^{-1} \left( \frac{y}{r_{int}} \right) \Big|_{-r_{int}}^{r_{int}}$$

$$e^{-\frac{v_p Sen \alpha}{\varepsilon_p} r_{ext}} \int_{-r_{int}}^{r_{int}} \sqrt{r_{int}^2 - y^2} dy = \frac{r_{int}}{2} Sen^{-1}(1) - \frac{r_{int}^2}{2} Sen^{-1}(-1)$$

$$e^{-\frac{v_p Sen \alpha}{\varepsilon_p} r_{ext}} \int_{-r_{int}}^{r_{int}} \sqrt{r_{int}^2 - y^2} dy = \frac{r_{int}}{2} \pi$$

Las siguientes dos integrales restantes que se tienen que resolver son:

$$\int_{-r_{ext}+h_B}^{r_{ext}} e^{-\left( \frac{v_p Sen \alpha}{\varepsilon_p} \right) y} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} dy$$

**Integral A**

$$\int_{-r_{int}}^{r_{int}} e^{-\left( \frac{v_p Sen \alpha}{\varepsilon_p} \right) y} \sqrt{r_{int}^2 - y^2} dy$$

**Integral B**

De antecedentes de cálculo integral se sabe que si una función  $f$  es continua en un intervalo cerrado  $[a, b]$ , debe existir la integral definida  $\int_a^b f(x)dx$ . En este caso

la función es una integral definida que no puede ser evaluada mediante métodos convencionales, es decir, mediante el teorema fundamental del cálculo y debido a la forma de la función no puede ser expresada esta en términos de funciones elementales, por ello se procederá a considerar la regla trapezoidal<sup>[27]</sup>.

Algunas integrales de la forma  $e^{-x^2}$ ,  $\text{Sen}(x^2)$ ,  $\sqrt{1-x^4}$ ,  $\frac{\text{Sen}(x)}{x}$ , se calculan con la regla trapezoidal, que fue el caso de estudio de este trabajo. La fórmula del área para el  $i$ -ésimo trapecio se expresa como:

$$A_j = \frac{h}{2} [f(y_{j-1}) + f(y_j)]$$

### Regla Trapezoidal

$$\int_a^b f(y)dy \approx \frac{h}{2} [f(y_0) + 2f(y_1) + 2f(y_2) + 2f(y_3) + \dots + 2f(y_{n-1}) + f(y_n)]$$

$$h = \frac{b-a}{n}$$

Para simplificar la integral  $\beta = \frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}$

$$\int_{-r_{ext}+h_B}^{r_{ext}} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} \exp[-\beta(y)] dy$$

Para la integral el valor de  $a$  viene expresado por  $a = -r_{ext} + h_B$ , y de  $b$  por  $b = r_{ext}$ , el valor de  $n$  (secciones o rebanadas de la integral) se elije como 6 para simplificar los cálculos.

En este caso  $h$  es igual a:  $h = \frac{r_{ext} - (-r_{ext} + h_{cama})}{6}$  entonces  $h = \frac{-h_B + 2 * r_{ext}}{6}$

$$y_0 = h - r_{ext}$$

$$f(y_0) \approx \sqrt{r_{ext}^2 - y_0^2} * \exp[-\beta(y_0)]$$

$$y_1 = (h - r_{ext}) + \frac{2 * r_{ext} - h}{6}$$

$$f(y_1) \approx \sqrt{r_{ext}^2 - y_1^2} * \exp[-\beta(y_1)]$$

$$y_2 = (h - r_{ext}) + \frac{2 * r_{ext} - h}{3}$$

$$f(y_2) \approx \sqrt{r_{ext}^2 - y_2^2} * \exp[-\beta(y_2)]$$

$$y_3 = (h - r_{ext}) + \frac{2 * r_{ext} - h}{2}$$

$$f(y_3) \approx \sqrt{r_{ext}^2 - y_3^2} * \exp[-\beta(y_3)]$$

$$y_4 = (h - r_{ext}) + \frac{2(2 * r_{ext} - h)}{3}$$

$$f(y_4) \approx \sqrt{r_{ext}^2 - y_4^2} * \exp[-\beta(y_4)]$$

$$y_5 = (h - r_{ext}) + \frac{5(2 * r_{ext} - h)}{6}$$

$$f(y_5) \approx \sqrt{r_{ext}^2 - y_5^2} * \exp[-\beta(y_5)]$$

$$y_6 = r_{ext}$$

$$f(y_6) \approx \sqrt{r_{ext}^2 - y_6^2} * \exp[-\beta(y_6)]$$

$$\int_{-r_{ext}+h_B}^{r_{ext}} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} \exp[-\beta(y)] dy \approx \frac{h_B + 2 * r_{ext}}{12} [f(y_0) + 2f(y_1) + \dots + 2f(y_5) + f(y_6)]$$

Para conocer el error de la regla trapezoidal se tiene el siguiente teorema:

Suponga que la segunda derivada de la función  $f$ , es decir  $f''$ , existe en el intervalo  $[a, b]$ , entonces

$$\int_a^b f(y) dy \approx \frac{h}{2} [f(y_0) + 2f(y_1) + 2f(y_2) + 2f(y_3) + \dots + 2f(y_{n-1}) + f(y_n)] + E_n$$

Donde el error esta dado por

$$E_n = -\frac{(b-a)^3}{12n^2} f''(c)$$

$c$  es el punto comprendido entre  $a$  y  $b$

$$f(y) = \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} \exp[-\beta(y)]$$

$$f'(y) = -\beta \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} \exp[-\beta(y)] - \frac{y * \exp[-\beta y]}{\sqrt{r_{ext}^2 - y^2}}$$

$$f'''(y) = \beta^2 \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} \exp[-\beta(y)] + \frac{\beta * y * \exp[-\beta y]}{\sqrt{r^2 - y^2}} - \frac{\exp[-\beta y]}{\sqrt{r^2 - y^2}} + \frac{\beta * y * \exp[-\beta y]}{\sqrt{r^2 - y^2}} - \frac{y^2 * \exp[\beta y]}{r^2 - y^2}$$

$$f'''(y) = \beta^2 \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} \exp[-\beta(y)] + \frac{2\beta * y * \exp[-\beta y]}{\sqrt{r^2 - y^2}} - \frac{\exp[-\beta y]}{\sqrt{r^2 - y^2}} - \frac{y^2 * \exp[\beta y]}{r^2 - y^2}$$

$$f'''(y) = \beta^2 \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} \exp[-\beta(y)] + \frac{\exp[-\beta y]}{\sqrt{r^2 - y^2}} (2\beta * y - 1) - \frac{y^2 * \exp[\beta y]}{r^2 - y^2}$$

$$f'''(c) = \beta^2 \sqrt{r_{ext}^2 - c^2} \exp[-\beta(c)] + \frac{\exp[-\beta * c]}{\sqrt{r^2 - c^2}} (2\beta * c - 1) - \frac{c^2 * \exp[\beta * c]}{r^2 - c^2}$$

En este caso se tendrá el error

$$E_n = -\frac{(2r_{ext} - h)^3}{12(6)^2} * f'''(c)$$

$$E_n = -\frac{(2r_{ext} - h)^3}{12(6)^2} \left[ \beta^2 \sqrt{r_{ext}^2 - c^2} \exp[-\beta(c)] + \frac{\exp[-\beta * c]}{\sqrt{r^2 - c^2}} (2\beta * c - 1) - \frac{c^2 * \exp[\beta * c]}{r^2 - c^2} \right]$$

Con el error y el resultado de la integral se garantiza que es integrable la función.

Para realizar los cálculos de la integral se requiere saber el valor de  $h_B$  y con ello se obtendrá el valor de la integral,  $h_B$  se obtendrá del resultado de la iteración que satisfaga tanto  $C_s$  de la ecuación **(6.5)** como  $C_s$  de la ecuación **(6.b)**.

De la misma forma con la regla trapezoidal se resuelve la integral B, únicamente se requiere cambiar los límites de integración.

Debido a que en el **Apéndice B** se realiza un programa de cómputo, en el los casos II y III no se desglosan las integrales ya que siguen la misma secuencia.

## 6.6.2. CONCENTRACION DE LA SUSPENSION CASO II

Realizando un promedio integral,  $C_S A_S = \int C_j(y) A_j dy$

$$C_S = \frac{\int C_j A_j dy}{A_{TS}}$$

Por un lado:

$$C(y) = \frac{C_B \left[ e^{-\left[\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}\right] y} - e^{-\left[\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}\right] r_{ext}} \right]}{\left[ e^{-\left[\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}\right] (-r_{ext} + h_B)} - e^{-\left[\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}\right] r_{ext}} \right]}$$

Por otro lado:

$$A_S = 2 \int_{-r_{ext}+h}^{r_{ext}} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} dy - 2 \int_{-r_{ext}+h}^{r_{int}} \sqrt{r_{int}^2 - y^2} dy$$

$$A_S = -(h_B - r_{ext}) \left[ \sqrt{2h_B r_{ext} - h_B^2} + \sqrt{r_{int}^2 - (h_B - r_{ext})^2} \right] + r_{ext}^2 \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) - \text{sen}^{-1} \left( \frac{h_B}{r_{ext}} - 1 \right) \right]$$

$$+ r_{int}^2 \left[ \text{sen}^{-1} \left( \frac{h_B + r_{ext}}{r_{int}} \right) - \frac{\pi}{2} \right]$$

Finalmente:

$$C_S = \frac{\left[ 2 \int_{-r_{ext}+h}^{r_{ext}} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} dy - 2 \int_{-r_{ext}+h}^{r_{int}} \sqrt{r_{int}^2 - y^2} dy \right] * \frac{C_B \left[ e^{-\left[\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}\right] y} - e^{-\left[\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}\right] r_{ext}} \right]}{\left[ e^{-\left[\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}\right] (-r_{ext} + h_B)} - e^{-\left[\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}\right] r_{ext}} \right]}}{\left\{ \begin{aligned} &-(h_B - r_{ext}) \left[ \sqrt{2h_B r_{ext} - h_B^2} + \sqrt{r_{int}^2 - (h_B - r_{ext})^2} \right] + r_{ext}^2 \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) - \text{sen}^{-1} \left( \frac{h_B}{r_{ext}} - 1 \right) \right] \\ &+ r_{int}^2 \left[ \text{sen}^{-1} \left( \frac{h_B + r_{ext}}{r_{int}} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \end{aligned} \right\}}$$

---

### 6.6.3. CONCENTRACION DE LA SUSPENSION CASO III

Realizando un promedio integral,  $C_s A_s = \int C_j(y) A_j dy$

$$C_s = \frac{\int C_j A_j dy}{A_{TS}}$$

Por un lado:

$$C(y) = \frac{C_B \left[ e^{-\left[\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}\right] y} - e^{-\left[\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}\right] r_{ext}} \right]}{\left[ e^{-\left[\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}\right] (-r_{ext} + h_B)} - e^{-\left[\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}\right] r_{ext}} \right]}$$

Por otro lado:

$$A_s = 2 \int_{-r_{ext} + h_B}^{r_{ext}} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} dy$$

$$A_s = r_{ext}^2 \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) - \text{sen}^{-1} \left( \frac{h_B}{r_{ext}} - 1 \right) \right] - (h_B - r_{ext}) \sqrt{2h_B r_{ext} - h_B^2}$$

Finalmente:

$$C_s = \frac{\left[ 2 \int_{-r_{ext} + h_B}^{r_{ext}} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} dy \right] * \frac{C_B \left[ e^{-\left[\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}\right] y} - e^{-\left[\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}\right] r_{ext}} \right]}{\left[ e^{-\left[\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}\right] (-r_{ext} + h_B)} - e^{-\left[\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}\right] r_{ext}} \right]}}{r_{ext}^2 \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) - \text{sen}^{-1} \left( \frac{h_B}{r_{ext}} - 1 \right) \right] - (h_B - r_{ext}) \sqrt{2h_B r_{ext} - h_B^2}}$$

---

## 6.7. CALCULO DE LA ALTURA DE LA CAMA

Inicialmente se calcula  $C_s$  de las ecuaciones **(6.1)** y **(6.2)**.

Retomando las ecuaciones **(6.1)** y **(6.2)**, se utilizaran para despejar  $C_s$ , esto con el fin de poder comparar este valor con  $C_s$  de la ecuación **(6.5)**.

$$U_S A_S C_S + U_B A_B C_B = U_m A_m C_m \quad (6.1)$$

$$U_S A_S (1 - C_S) + U_B A_B (1 - C_B) = U_m A_m (1 - C_m) \quad (6.2)$$

Sumando las ecuaciones **(6.1)** y **(6.2)** se tiene:

$$U_S A_S + U_B A_B = U_m A_m$$

Despejando  $U_S$

$$U_S = \frac{U_m A_m - U_B A_B}{A_S}$$

$$A_m = A_S + A_B \quad A_B = A_m - A_S$$

$$U_S = \frac{U_m A_m - U_B (A_m - A_S)}{A_S}$$

De la ecuación **(6.1)** se despeja  $C_s$

$$C_S = \frac{U_m A_m C_m - U_B A_B C_B}{U_S A_S}$$

Se sustituye  $U_S$  y  $A_B$

$$C_S = \frac{U_m A_m C_m - U_B (A_m - A_S) C_B}{U_m A_m - U_B (A_m - A_S)} \quad (6.b)$$



Ahora se tienen dos ecuaciones  $C_s$  que calcularán la concentración de la suspensión, pero por caminos diferentes, estas son la ecuación **(6.5)** y la ecuación **(6.b)**.

Se iguala  $U_B = U_{\min B}$  (ecuación **(6.a)**) para tener un valor inicial, quedando  $U_B$  solo en función de la altura de la cama de recortes.

Para obtener el valor de la altura de la cama de recortes se tiene que iterar la ecuación de concentración de la suspensión ( $C_s$ ), ecuación **(6.b)**, dándole valores a  $h_B$  y comparar el valor de la ecuación de concentración de la suspensión ( $C_s$ ) de la ecuación **(6.5)**, proponiendo una tolerancia, si la tolerancia se cumple, entonces la altura de la cama será  $h_B$ . Si el diámetro del recorte es mayor a  $h_B$ , entonces existe una cama de recorte ( $h_B \geq d_r$  para que exista cama de recortes).

## 6.8. ESTADO DE LA CAMA DE RECORTES

Hasta aquí se ha obtenido la altura de la cama de recortes, falta saber si esa cama de recortes esta fija o en movimiento, para ello se tiene que calcular los valores de  $F_b$  y  $F_{b\max}$ .

De la ecuación **(6.3)** y la ecuación **(6.4)**, ahora se tienen dos ecuaciones con dos incógnitas, se despeja  $\left[\frac{dP}{dL}\right]$  y la fuerza de contacto, por lo tanto  $\frac{F_{cont}}{L} = F_b$ .

Si  $F_b \geq F_{b\max}$  entonces la cama de recortes se encuentra en movimiento por lo tanto se toma el valor de la velocidad de la cama de arena calculado

anteriormente y  $\frac{dP}{L} \left[ \frac{\frac{gr_f}{cm^2}}{cm} \right] = 0.1 \frac{dP}{L} \left[ \frac{\frac{Kg_f}{cm^2}}{m} \right]$  debido a la conversión de unidades a

metros.

Se espera que si  $F_b < F_{b\max}$ , la velocidad de la cama de recortes es cero y nuevamente se calcularán los valores con  $U_B = 0$ . Con esto último se finaliza la solución del modelo, ya que se encontraron todas las incógnitas planteadas las cuales fueron:  $h_B$ ,  $C_s$ ,  $U_s$ ,  $U_B$  y  $\frac{dP}{L}$ . Se pretende que en el desglose de las

ecuaciones se haya logrado el propósito, el cual fue hacer el presente trabajo lo más didáctico posible para facilitar la comprensión del lector y que no existan dudas en la obtención de los resultados.

---

## 7. ANALISIS Y COMPROBACION DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se realizará un análisis de los resultados obtenidos con el programa de cómputo (**Apéndice B**), así también para la comprobación del modelo se recurrió a los datos utilizados por R.K. Clark y K.L. Bickham<sup>[1]</sup>. Se analizan también los datos obtenidos por el programa de cómputo para el Pozo Alquimia 31, así también se graficaron los diferentes parámetros como grados de inclinación del pozo, gasto y densidad del fluido de perforación.

### 7.1. INFORMACIÓN REQUERIDA PARA REALIZAR LAS CORRIDAS

La información utilizada para realizar las corridas se observa en la **Tabla 7.1**, dicha información fue tomada de la literatura<sup>[1]</sup>.

**Tabla 7.1. Parámetros utilizados en la comprobación del modelo.**

| Parámetro                                | Valor              |
|--|--------------------|
| Modelo Reológico                         | Herschel & Bulkley |
| Velocidad de Penetración (m/min)         | 0.254065           |
| Gasto del Fluido (gal/min)               | 620                |
| Densidad del fluido (gr/cc)              | 1.50               |
| Viscosidad Plástica [VP] (cp)            | 40                 |
| Punto de cedencia ( $lb_f/100 ft^2$ )    | 17                 |
| Esfuerzo de cedencia ( $lb_f/100 ft^2$ ) | 6                  |
| Densidad del recorte (gr/cc)             | 2.30               |
| Diámetro del recorte (pg)                | 0.25               |
| Porosidad de la cama de recorte (%)      | 37                 |

El programa requiere la Viscosidad Efectiva del fluido, por ello se partirá de los datos de la **Tabla 7.1**, para ello se requieren las lecturas del viscosímetro Fann, en este caso se realizó el procedimiento para la viscosidad efectiva del **Apéndice A** y se comprobaron de una prueba de laboratorio arrojando resultados similares, estos resultados se muestran en la **Tabla 7.2**.

**Tabla 7.2. Comparación de lecturas del Viscosímetro Fann.**

| Lecturas Fann | Viscosímetro | Resultados obtenidos de datos de la Tabla 8.1 | Resultados obtenidos en el Laboratorio |
|---------------|--------------|---|--|
| 600           |              | 97  | 97                                     |
| 300           |              | 57  | 57                                     |
| 200           |              | 41  | 43                                     |
| 100           |              | 25  | 29                                     |
| 6             |              | 7   | 14                                     |
| 3             |              | 6   | 13                                     |

---

## 7.2. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO PROPUESTO

Con los datos de las **Tablas 7.1 y 7.2**, se corrió el programa de cómputo y los resultados que se obtuvieron se muestran en la **Tabla 7.3**, comparándolos con los obtenidos por Clark<sup>[1]</sup>.

**Tabla 7.3 Comparación de resultados de la altura de la cama de recortes.**

| #  | Profundidad [m] | Ángulo del Pozo [°] | Diámetro Agujero [pg] | Diámetro Exterior TP [pg] | Altura de la Cama de Recortes Modelo Clark [cm] | Altura de la Cama de Recortes Modelo Propuesto [cm] |
|----|-----------------|---------------------|-----------------------|---------------------------|---|---|
| 1  | 0               | 0.0                 | 12.347                | 5.0                       | 0.000   | 0.000   |
| 2  | 278.96          | 27.5                | 12.347                | 5.0                       | 3.048   | 5.654   |
| 3  | 480.18          | 38.8                | 12.347                | 5.0                       | 6.096   | 6.527   |
| 4  | 567.07          | 43.3                | 12.347                | 5.0                       | 6.604   | 6.812   |
| 5  | 660.06          | 44.0                | 12.347                | 5.0                       | 6.604   | 6.8222  |
| 6  | 888.72          | 35.9                | 12.347                | 5.0                       | 5.334   | 6.337   |
| 7  | 917.68          | 33.5                | 12.347                | 5.0                       | 4.826   | 6.164   |
| 8  | 917.99          | 33.5                | 12.250                | 5.0                       | 4.572   | 6.086   |
| 9  | 974.08          | 32.2                | 12.250                | 5.0                       | 4.064   | 5.987   |
| 10 | 1143.29         | 25.1                | 12.250                | 5.0                       | 0.000   | 5.344   |
| 11 | 1317.07         | 15.9                | 12.250                | 5.0                       | 0.000   | 4.142   |
| 12 | 1390.24         | 12.0                | 12.250                | 5.0                       | 0.000   | 3.414   |
| 13 | 1486.28         | 6.0                 | 12.250                | 5.0                       | 0.000   | 1.709   |
| 14 | 1600.61         | 2.2                 | 12.250                | 5.0                       | 0.000   | 0   |
| 15 | 1692.07         | 8.9                 | 12.250                | 5.0                       | 0.000   | 2.665   |
| 16 | 1737.80         | 20.4                | 12.250                | 5.0                       | 0.000   | 4.798   |
| 17 | 1788.11         | 33.8                | 12.250                | 5.0                       | 4.572   | 6.108   |
| 18 | 1832.32         | 44.9                | 12.250                | 5.0                       | 6.35  | 6.782   |
| 19 | 1861.28         | 48.4                | 12.250                | 5.0                       | 7.112   | 6.945   |
| 20 | 1903.96         | 47.1                | 12.250                | 5.0                       | 7.112   | 6.887   |
| 21 | 1913.11         | 50.0                | 12.250                | 5.0                       | 7.112   | 7.013   |
| 22 | 1923.78         | 52.7                | 12.250                | 5.0                       | 9.398   | 7.119   |
| 23 | 1939.02         | 57.2                | 12.250                | 5.0                       | 9.144   | 7.272   |
| 24 | 1961.89         | 62.0                | 12.250                | 5.0                       | 8.890   | 7.409   |
| 25 | 1989.33         | 70.0                | 12.250                | 5.0                       | 8.128   | 7.579   |

## 7.3. ALTURA DE LA CAMA DE RECORTES CONTRA ÁNGULO DE INCLINACIÓN

Debido a que resulta difícil hacer la comparación a simple vista observando los datos de la **Tabla 7.3**, con los resultados anteriores (de la **Tabla 7.3**) se realizaron dos gráficas, una para el diámetro del agujero de 12.347" y otra para el diámetro del agujero de 12.25", ambas graficando los grados de inclinación contra la altura de la cama de recortes. Cada gráfica representará un segmento del pozo, de acuerdo al diámetro del pozo. A continuación se presentan las dos gráficas obtenidas, **Figura 7.1 y 7.2**.

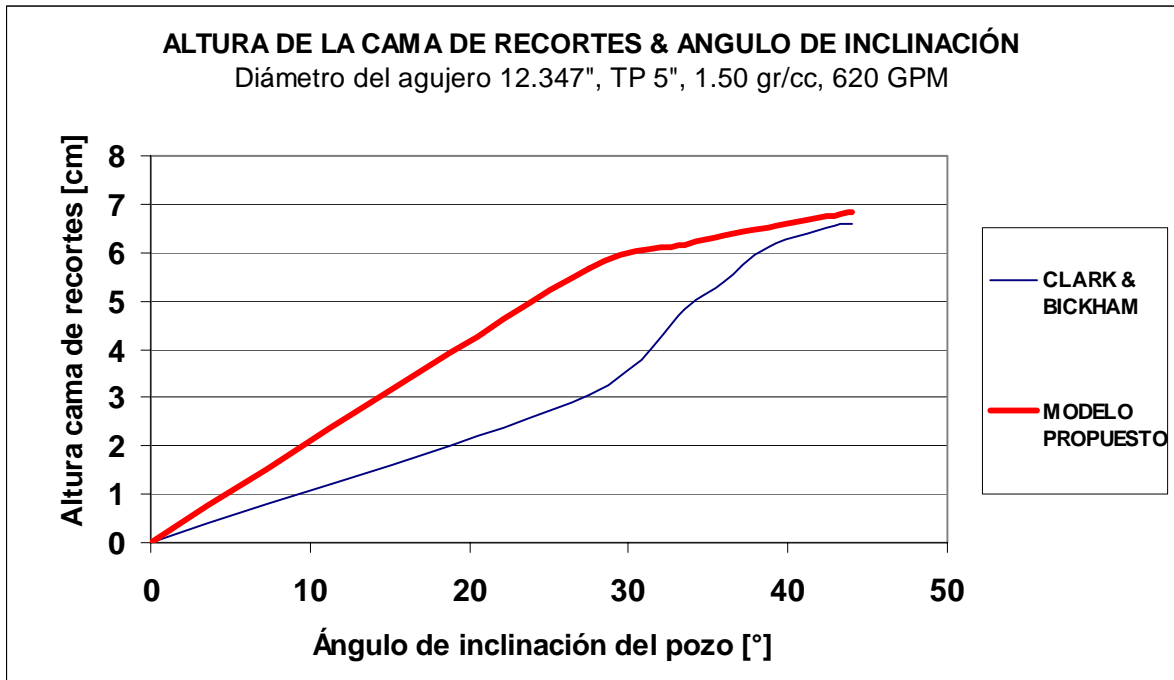


Figura 7.1. Altura de la cama de recortes & ángulo de inclinación (Barrena 12.347 y TP 5").

En la **Figura 7.1** se observa que al incrementar el ángulo de inclinación del pozo, existe una tendencia de acercarse los valores de las dos series de datos (Clark & Bickham y el modelo propuesto). En las dos series a 28° existe un cambio drástico cambiando la pendiente, de 40° en adelante se observa que los dos modelos convergen a un mismo valor de altura de cama de recortes, observando una tendencia estable.

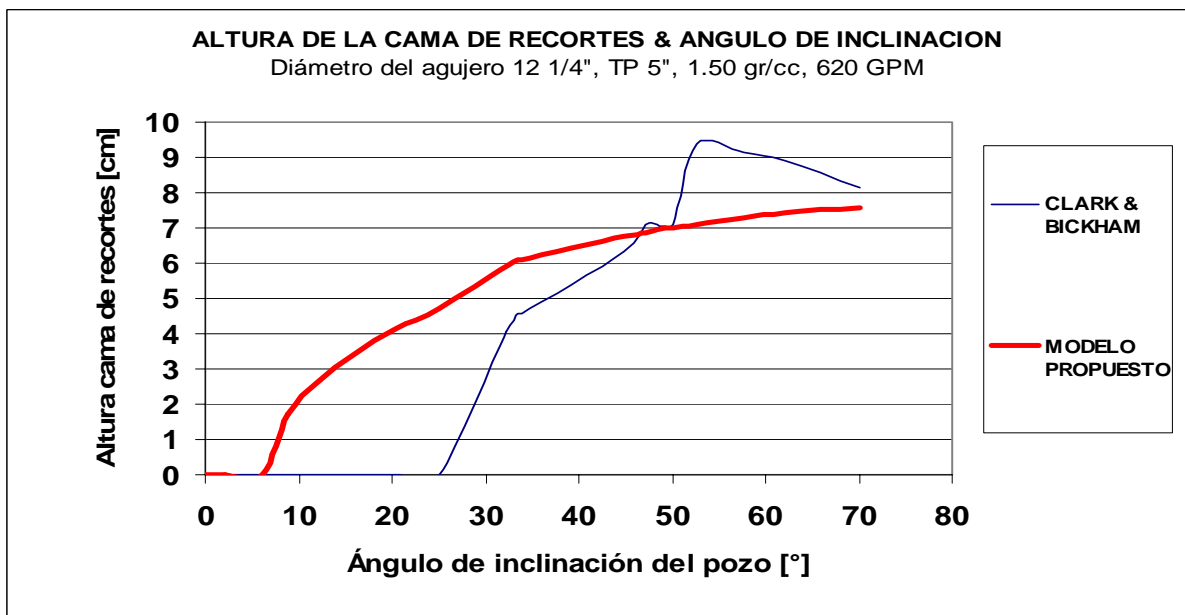


Figura 7.2.- Altura de la cama de recortes & ángulo de inclinación (Barrena 12 1/4" y TP 5").

En la **Figura 7.2** en 45° y 48° los modelos se intersecan, posteriormente el modelo de Clark & Bickham se aleja y a 52° este modelo cambia de pendiente. Después de 70° existe una tendencia a que los dos modelos converjan a un mismo valor de altura de cama de recortes. En esta figura se observa que el modelo propuesto es mas sensible a ángulos pequeños ya que inicia a detectar altura de cama de recortes a 6° y el modelo de Clark & Bickham es hasta los 25° donde empieza a sensibilizarse y detecta una cama de recortes. Se observa una tendencia mas estable en el modelo propuesto, ya que nunca cambia de pendiente y, al igual que el modelo de Clark & Bickham a 33° de inclinación del pozo existe una variación en la pendiente. Analizando las dos figuras (**Figura 7.1 y 7.2**), se observan tendencias similares del modelo propuesto, mientras que el modelo de Clark & Bickham existen diferentes variaciones y cambios de pendiente abruptos en las gráficas pasando de positiva a negativa y regresándose.

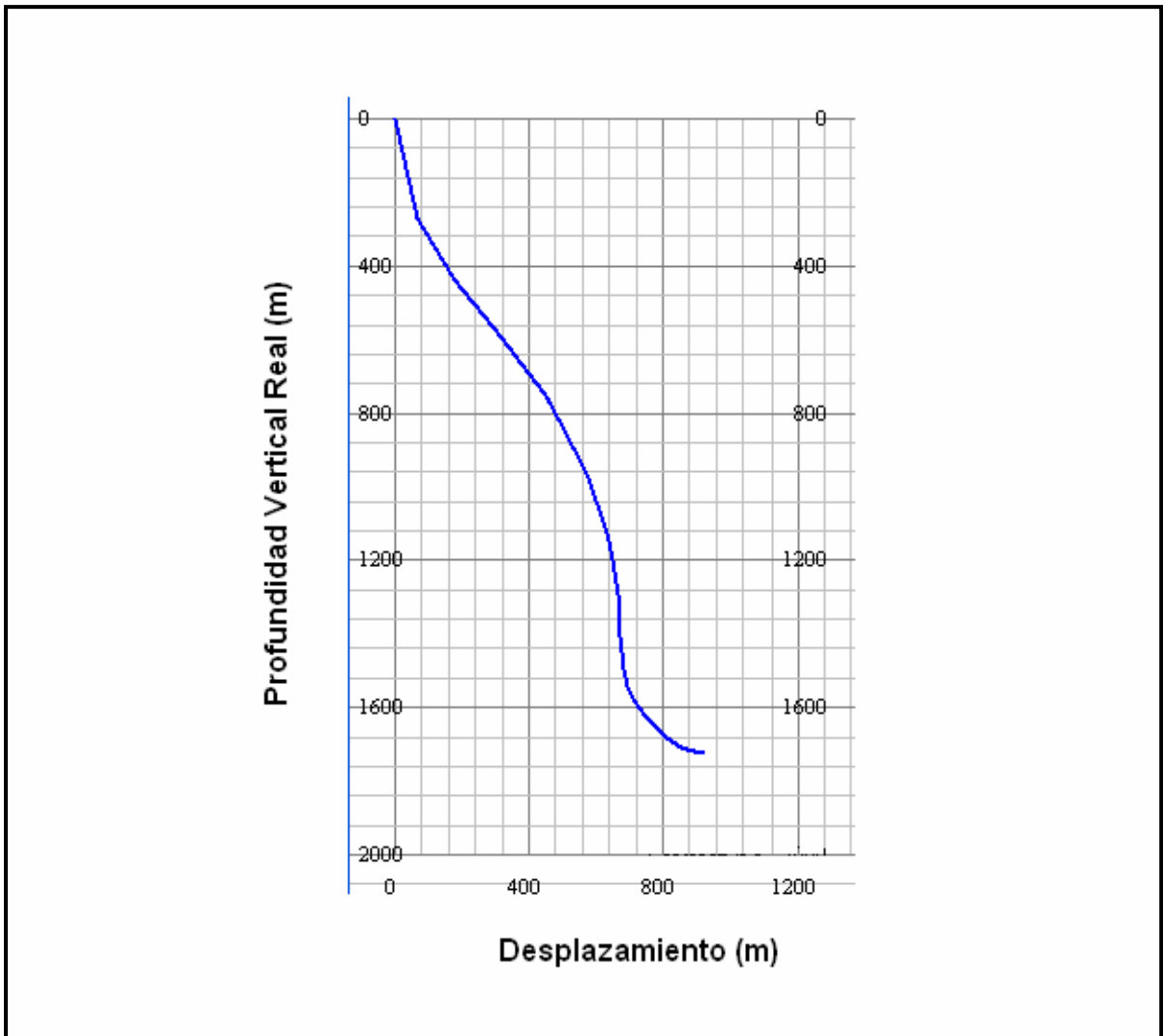
#### 7.4. TRAYECTORIA DIRECCIONAL DEL EJERCICIO ANALIZADO

Con los datos de inclinación del pozo y profundidad, asumiendo que el azimud es cero en cualquier profundidad, se obtuvo la **Tabla 7.4** que muestra la severidad (pata de perro) que existe en el pozo de referencia.

**Tabla 7.4. Datos direccionales del pozo analizado.**

| Prof    | Inc  | Az | TVD     |        |     | Vsec(m) | Severidad<br>(°/30m) |
|---------|------|----|---------|--------|-----|---------|----------------------|
|         |      |    | (m)     | N/S    | E/W |         |                      |
| 0       | 0    | 0  | 0       | 0      | 0   | 0       | 0                    |
| 278.89  | 27.5 | 0  | 268.32  | 65.65  | 0   | 65.65   | 3.01                 |
| 480.06  | 38.8 | 0  | 436.47  | 175.47 | 0   | 175.47  | 1.71                 |
| 566.93  | 43.3 | 0  | 501.94  | 232.5  | 0   | 232.5   | 1.58                 |
| 659.89  | 44   | 0  | 569.21  | 296.69 | 0   | 296.69  | 0.23                 |
| 888.49  | 35.9 | 0  | 744.32  | 443.36 | 0   | 443.36  | 1.08                 |
| 917.45  | 33.5 | 0  | 768.13  | 459.82 | 0   | 459.82  | 2.53                 |
| 917.75  | 33.5 | 0  | 768.37  | 460    | 0   | 460     | 0                    |
| 973.84  | 32.2 | 0  | 815.49  | 490.42 | 0   | 490.42  | 0.71                 |
| 1143    | 25.1 | 0  | 963.84  | 571.47 | 0   | 571.47  | 1.28                 |
| 1316.74 | 15.9 | 0  | 1126.42 | 632.25 | 0   | 632.25  | 1.61                 |
| 1392.63 | 12   | 0  | 1200.06 | 650.53 | 0   | 650.53  | 1.57                 |
| 1485.9  | 6    | 0  | 1292.14 | 665.13 | 0   | 665.13  | 1.96                 |
| 1600.2  | 2.2  | 0  | 1406.1  | 673.3  | 0   | 673.3   | 1.01                 |
| 1691.64 | 8.9  | 0  | 1497.09 | 682.14 | 0   | 682.14  | 2.23                 |
| 1737.36 | 20.4 | 0  | 1541.22 | 693.69 | 0   | 693.69  | 7.67                 |
| 1787.65 | 33.8 | 0  | 1585.9  | 716.55 | 0   | 716.55  | 8.12                 |
| 1831.85 | 44.9 | 0  | 1620.01 | 744.53 | 0   | 744.53  | 7.66                 |
| 1860.8  | 48.4 | 0  | 1639.89 | 765.57 | 0   | 765.57  | 3.68                 |
| 1903.48 | 47.1 | 0  | 1668.6  | 797.17 | 0   | 797.17  | 0.93                 |
| 1912.62 | 50   | 0  | 1674.63 | 804    | 0   | 804     | 9.67                 |
| 1923.29 | 52.7 | 0  | 1681.31 | 812.35 | 0   | 812.35  | 7.71                 |
| 1938.53 | 57.2 | 0  | 1690.05 | 824.82 | 0   | 824.82  | 9                    |
| 1961.39 | 62   | 0  | 1701.61 | 844.54 | 0   | 844.54  | 6.4                  |
| 1988.82 | 70   | 0  | 1712.76 | 869.56 | 0   | 869.56  | 8.89                 |

También se gráfico la sección del perfil del pozo analizado, la cual se observa en la **Figura 7.3**.



**Figura 7.3. Sección transversal del pozo analizado.**

Al analizar la **Figura 7.3** se observa que en el pozo existen cambios bruscos con la inclinación ya que con los datos de la **Tabla 7.4** se tuvo una severidad a 1912.62 m de  $9.67^{\circ}/30\text{m}$  al alcanzar los 50 grados de inclinación, siendo esta severidad la mayor de dicho pozo. Es crítico lo anterior por que se pudo correr el riesgo de que no pasaran las herramientas, e inclusive al bajar la tubería de revestimiento para cementar pudo haber sido una restricción.

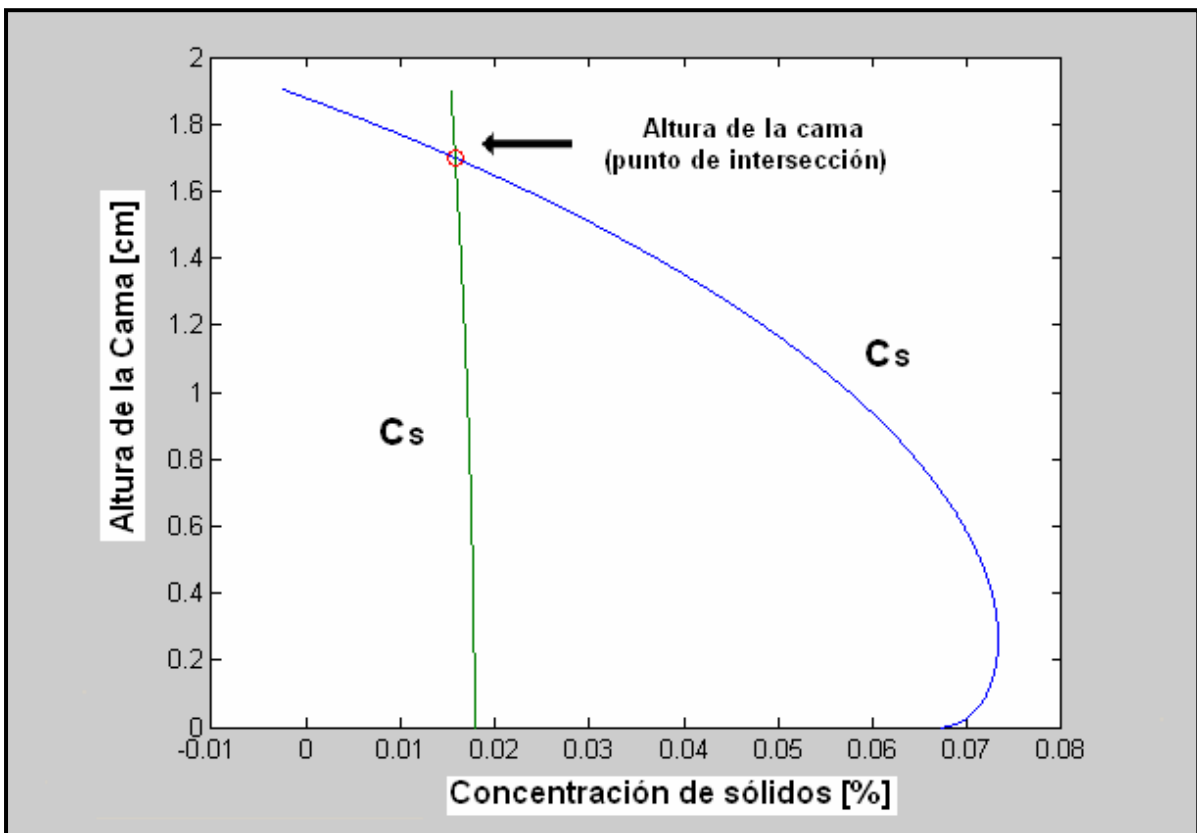
## 7.5. RESULTADOS DE LA CORRIDA DEL POZO ARQUIMIA 31

El análisis incluyó al pozo Arquimia 31, en el cual se realizó una corrida con el programa de computo del modelo propuesto (**Apéndice B**), donde se utilizaron los datos de la **Tabla 7.5**.

**Tabla 7.5. Parámetros utilizados en la corrida del modelo para el pozo Arquimia 31.**

| Parámetro                                | Valor              |
|--|--------------------|
| Modelo Reológico                         | Herschel & Bulkley |
| Velocidad de Penetración (m/min)         | 1                  |
| Gasto del Fluido (gal/min)               | 270                |
| Densidad del fluido (gr/cc)              | 1.37               |
| Viscosidad Plástica [VP] (cp)            | 23                 |
| Punto de cedencia ( $lb_f/100 ft^2$ )    | 18                 |
| Esfuerzo de cedencia ( $lb_f/100 ft^2$ ) | 6                  |
| Densidad del recorte (gr/cc)             | 2.52               |
| Diámetro del recorte (pg)                | 0.2                |
| Porosidad de la cama de recorte (%)      | 52                 |

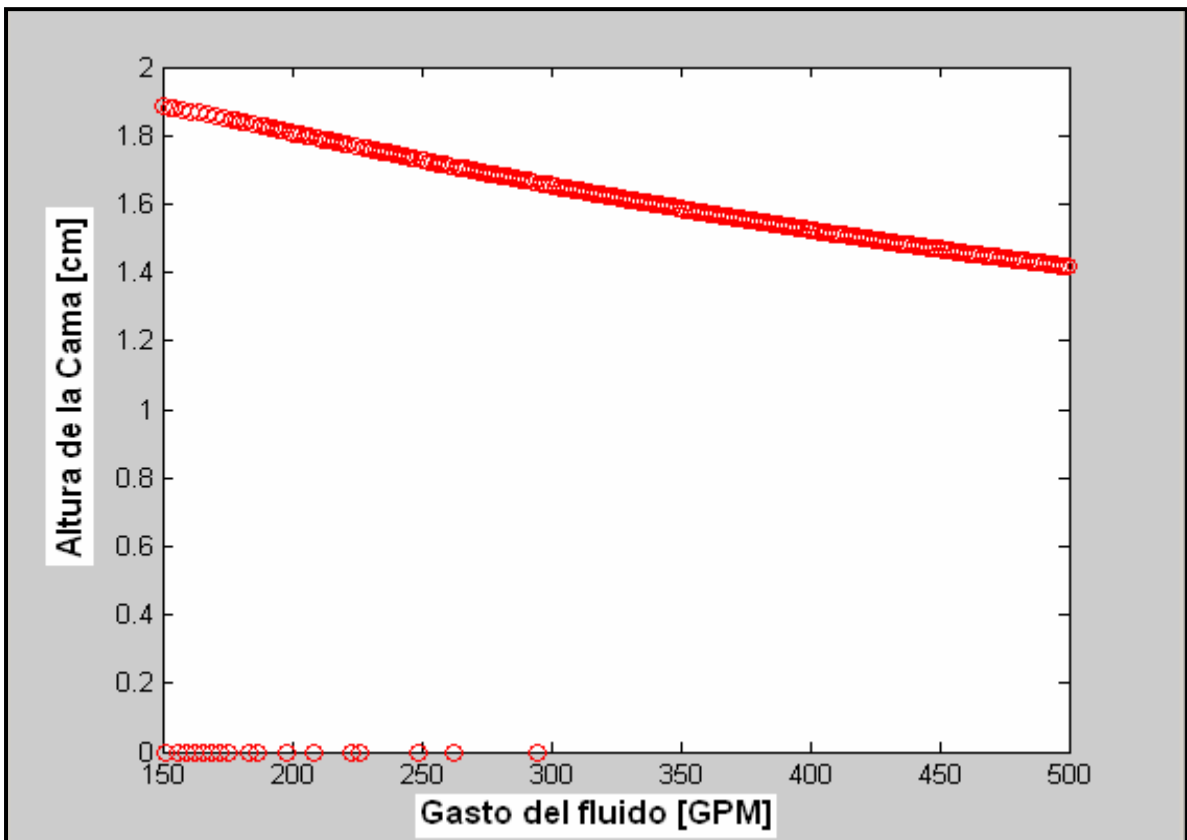
Con los datos de la **Tabla 7.5** la altura de la cama de recortes que arrojó el modelo para el pozo Arquimia 31 fue de 1.698 cm, el resultado se muestra en la **Figura 7.4.**:



**Figura 7.4. Resultados de la altura de la cama de recortes del pozo Arquimia 31.**

La gráfica de concentraciones del pozo Arquimia 31 que se obtuvo se observa en la **Figura 7.4**, a las condiciones del pozo la cama de recortes formada era de aproximadamente 1.698 cm, lo cual pudo haber originado el atropamiento de la sarta, ya que las condiciones del pozo eran críticas debido al alto ángulo de inclinación, pero por otro lado las condiciones de la bomba de fluidos era limitada, y el incremento en la presión de bombeo también, ya que con 270 GPM se tenían  $196 \text{ Kg/cm}^2$  ( $2800 \text{ lb/pg}^2$ ). Las especificaciones de la bomba se muestran en la **Tabla 7.6**. Por otro lado la alta velocidad anular de 366 pies/min de los recortes pudieron influir erosionando el enjarre que se tenía en ese momento el cual era de 1 cm y pudo haber provocado un derrumbe. Lo anterior aunado a la conexión de la tubería de perforación que se realizó en el momento del atropamiento de la sarta coincidiendo varios factores para que se provocara dicho atropamiento.

Con los datos originales se realizaron corridas variando el gasto de 100 galones por minuto (GPM) hasta 500 GPM, los resultados se muestran en la **Figura 7.5** donde se logra observar que aunque incrementemos el gasto la altura de la cama de recortes disminuirá de manera lenta, es decir, que aunque se suba el gasto será difícil eliminar la cama de recortes y se tendrá que estar trabajando con esta.



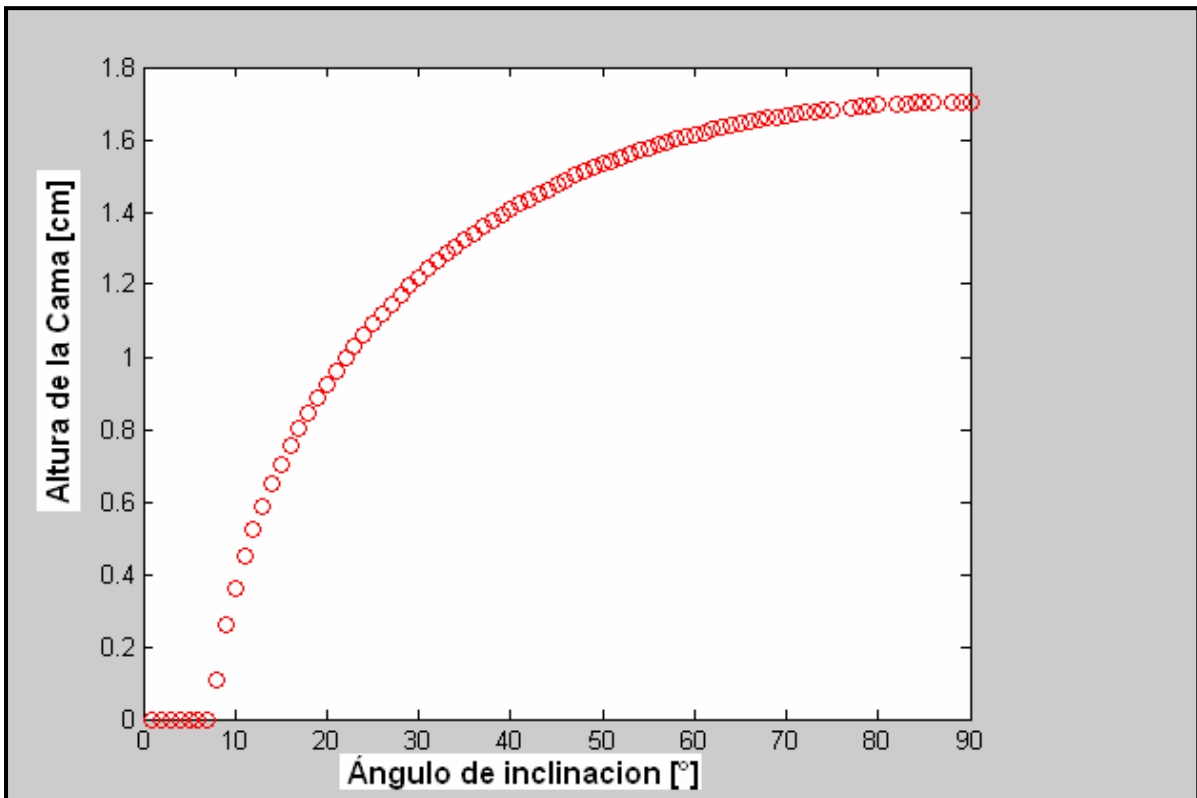
**Figura 7.5.** Gráfica de la altura de la cama de recortes del pozo Arquimia 31, variando el gasto.



**Tabla 7.6. Especificaciones de la bomba triplez Gardnet Denver.PZ8 750 HP Triplex.**

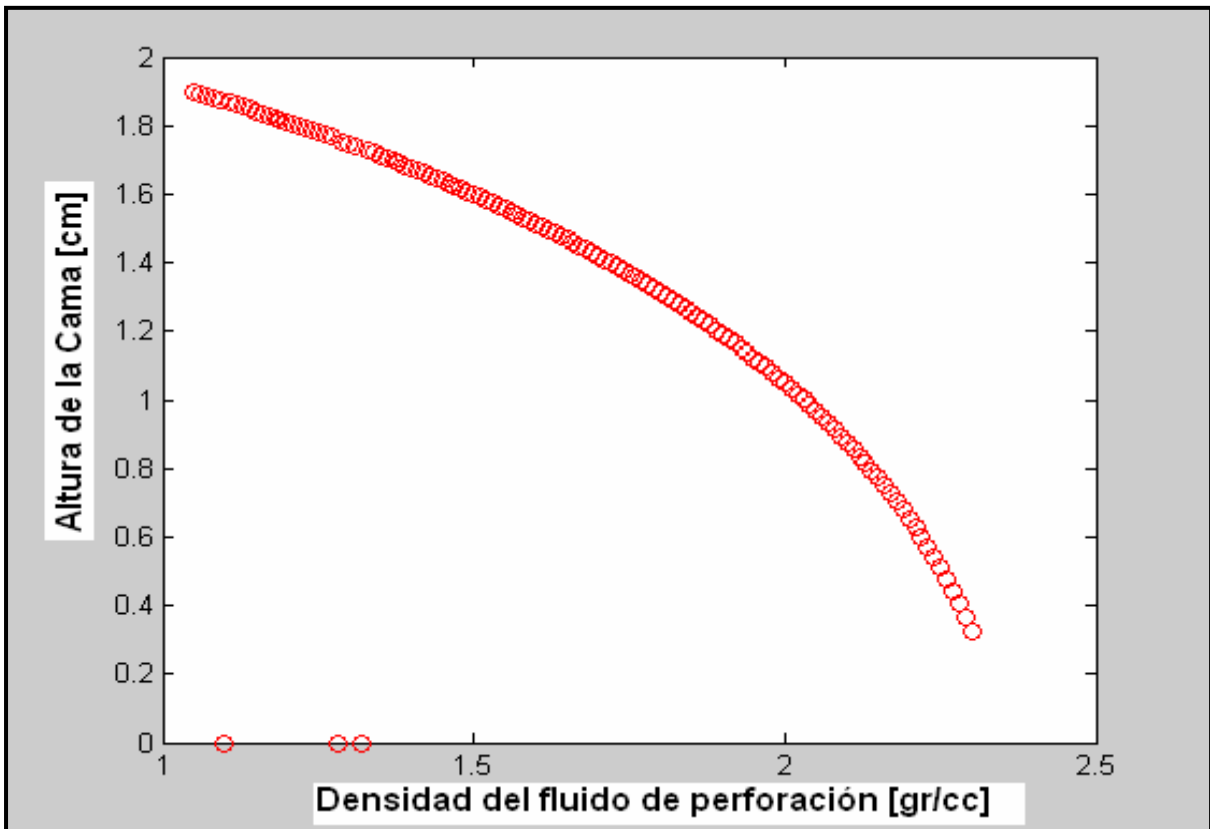
| Marca          | Tipo    | Modelo | Camisas  | Gasto Máximo | Potencia |
|----------------|---------|--------|----------|--------------|----------|
| Gardner Denver | Triplex | PZ-8   | 5/2"x10" | 407 GPM      | 750 HP   |

En la **Figura 7.6** se observa graficada la altura de la cama de recortes del pozo Arquimia 31 vs el ángulo de inclinación del pozo, variando el ángulo desde cero grados hasta 90°, lo anterior para observar como impacta el ángulo en la altura de la cama de recortes. Se puede observar que a ángulos de inclinación menores a 10° no existe cama de recortes, el mayor incremento en la altura de la cama se logra entre los 20° y 60° y se sigue una tendencia mas suave de 60° a 90°, a lo anterior se puede concluir que es crucial el ángulo de inclinación que tenga el pozo que se este perforando, se tiene que poner especial cuidado al construir las curvas de los pozos y ver la tendencia de las camas de recorte para evitar cualquier posible atrapamiento de tuberías por acumulación de recortes en la cara baja del pozo.



**Figura 7.6. Altura de la cama de recortes del pozo Arquimia 31 vs ángulo de inclinación.**

En la **Figura 7.7** se muestra la variación de la cama de recortes vs la densidad del lodo de perforación, se observó como impacta la densidad del lodo de perforación, la densidad del fluido se podría elevar hasta 2.3 gr/cc, donde se elimina la cama, generando una densidad equivalente de circulación de 2.60 gr/cc y esta densidad ya no la soportarían las paredes de la formación, para tomar una decisión de incrementar la densidad se tiene que tomar en cuenta el gradiente de fractura que para el campo Arquimia de a cuerdo a pruebas de goteo realizadas es de 2.10 gr/cc.



**Figura 7.7.** Altura de la cama de recortes vs densidad del fluido de perforación.

El modelo que se propone es para tuberías concéntricas, es decir, tiene 0% de excentricidad debido a que actualmente existen dispositivos tales como los centradores de bajo torque, donde además de reducir el torque y arrastre en la tubería de perforación, también centran la tubería, estos centradores tienen una caída de presión mínima, equivalente a 3.3 lb/pg<sup>2</sup> por cada centrador en tuberías de 5 pg, esto es por que el área de flujo de estos es grande.

Eliminar la cama de recortes no es tan sencillo y no depende de un solo factor, se tienen que combinar varios parámetros para que dicha cama pueda ser erosionada y algunas veces no se podrá erosionar esta, pero se sabrá el comportamiento y se minimizarán los riesgos, teniendo que optimizar la cama de recortes de perforación para que no cause ningún problema.

---

## 7.6. DENSIDADES DE LA LITOLOGIA

Es importante conocer las densidades de la litología que se este perforando, aunque la densidad del recorte varía de 2.18 gr/cc a 2.98 gr/cc, será conveniente cuando se tenga información de la litología ajustar el valor de la densidad del recorte, así también si existe un quiebre en la perforación se tendrá corregir el programa por ello se muestran algunas las densidades litológicas en la **Tabla 7.7**.

**Tabla 7.7. Densidades litológicas.**

| <b>LITOLOGIA</b>          | <b>DENSIDAD GR/CC</b> |
|---------------------------|-----------------------|
| Anhidrita                 | 2.98                  |
| Arenisca                  | 2.10                  |
| Arenisca Estratificada    | 2.12                  |
| Arenisca Calcárea         | 2.18                  |
| Arenisca-Lutita           | 2.52                  |
| Brecha                    | 2.35                  |
| Caliza                    | 2.77                  |
| Caliza Arcillosa          | 2.70                  |
| Caliza Arenosa            | 2.55                  |
| Caliza estratificada      | 2.85                  |
| Caliza conchífera         | 2.60                  |
| Caliza con Pedernal       | 2.65                  |
| Caliza oolítica           | 2.46                  |
| Conglomerado              | 2.40                  |
| Dolomia                   | 2.88                  |
| Lentes de arenisca-Lutita | 2.20                  |
| Limolita                  | 2.19                  |
| Limolita o acilla maciza  | 2.63                  |
| Lutita                    | 2.67                  |
| Lutita calcárea           | 2.50                  |
| Lutita Petrolífera        | 2.65                  |
| Pedernal estratificado    | 2.90                  |
| Roca Ignea Maciza         | 2.87                  |
| Sal                       | 2.71                  |
| Toba y brecha toba        | 2.83                  |
| Yeso                      | 2.35                  |

---

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1. CONCLUSIONES

El presente trabajo no pretende ser una guía para la perforación de alcance extendido sino más bien sustentar que éste tipo de perforación es una opción para acceder las zonas protegidas de flora y fauna de nuestro país. De igual forma generar la inquietud de su estudio para que en un futuro Petróleos Mexicanos entre en el selecto grupo de operadoras internacionales que han realizado este tipo de proyectos de alcance extendido.

Asimismo para que la perforación de alcance extendido sea eficaz, se requiere ver el comportamiento de la cama de recortes, un aspecto importante es eliminar la cama de recortes lo cual no es tan sencillo y no depende de un solo factor, se tienen que combinar varios parámetros para que dicha cama pueda ser erosionada.

Por otro lado se vio la necesidad de desarrollar un modelo hidráulico y proponer una ecuación, resultado del análisis y desarrollo, tomando en cuenta las investigaciones anteriores en dicho ámbito dando como resultado la siguiente ecuación:

$$C_S = \frac{\left[ 2 \int_{-r_{ext}+h_B}^{r_{ext}} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} dy - 2 \int_{-r_{int}}^{r_{int}} \sqrt{r_{int}^2 - y^2} dy \right] * \frac{C_B \left[ e^{-\left[\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}\right] y} - e^{-\left[\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}\right] r_{ext}} \right]}{\left[ e^{-\left[\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}\right] (-r_{ext}+h_B)} - e^{-\left[\frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p}\right] r_{ext}} \right]}}{r_{ext}^2 \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) - \text{sen}^{-1} \left( \frac{h_B}{r_{ext}} - 1 \right) \right] - (h_B - r_{ext}) \sqrt{2h_B r_{ext} - h_B^2} - \pi r_{int}^2}$$

Los resultados finales del modelo hidráulico propuesto se compararon con los resultados del modelo de Clark & Bickham, lo cual da veracidad.

Del pozo de desarrollo Arquimia 31 se llegó a la conclusión de que la altura de la cama de recortes de 1.698 cm pudo haber sido una de las causas por la cual la sarta quedó atrapada.

---

## **8.2. RECOMENDACIONES**

Como resultado de la presente investigación se dan las siguientes recomendaciones:

Correr el modelo hidráulico de esta investigación con pozos reales para que sea ajustado y no existan variaciones que pudieran causar confusión en los resultados que arroje el programa de cómputo y monitorear la altura de la cama de recortes en toda la sección del agujero.

Partiendo de los resultados de la investigación que nos da la altura de la cama de recortes de forma puntual se tendrá que hacer un modelado en toda la sección del pozo para ver el comportamiento de la cama de recortes y saber en que punto va a ser difícil erosionarla independientemente de los parámetros que se tenga.

Enriquecer el programa de cómputo mostrando las variación de los parámetros de forma visual, con el fin de poder comprender como se comporta la cama de recortes y hacer al programa más amigable e interactivo.

---

## APÉNDICE A

### SECUENCIA DE CÁLCULO

El siguiente procedimiento se realizara para calcular inicialmente la cama de recortes y posteriormente se definirá el estado de esa cama de recortes. Solo se analizará el Caso I, que es con el que mayor frecuencia se comportan las camas de recortes de los pozos petroleros. Se utilizarán los datos que se emplean en el Apéndice B (Programa de Cómputo del Modelo Hidráulico), todos los cálculos estarán en el sistema C.G.S:

$$\begin{aligned} Q &= 270 \text{ gal / min} & \Rightarrow & Q * 63.0833[\text{cm}^3 / \text{seg}] \\ ROP &= 1.0 \text{ m / min} & \Rightarrow & ROP * 1.66667[\text{cm} / \text{seg}] \\ D_{OH} &= 6 \text{ pg} & \Rightarrow & D_{OH} * 2.54[\text{cm}] \\ DExt_{TP} &= 4.5 \text{ pg} & \Rightarrow & DExt_{TP} * 2.54[\text{cm}] \\ AnguloPozo &= 82.5^\circ \\ \rho_{rec} &= 1.8 \text{ gr / cc} \\ \rho_{liq} &= 1.37 \text{ gr / cc} \\ Diam_{recorte} &= 0.1 \text{ pg} & \Rightarrow & Diam_{recorte} * 2.54[\text{cm}] \\ Porosidad &= 0.20 \end{aligned}$$

### CALCULO DE LOS PARAMETROS TOTALES DE LA MEZCLA

$$\begin{aligned} A_m &= \frac{\pi}{4} [D_{OH}^2 - D_{TP}^2] & A_m &= \frac{\pi}{4} [15.24^2 - 11.45^2] & A_m &= 79.45 \text{ cm}^2 \\ C_m &= \frac{\pi D_{OH}^2 ROP}{4 Q} & C_m &= \frac{\pi 15.24^2 * 1.66667}{4 * 17032.5} & C_m &= 0.01785 \\ U_m &= \frac{Q}{A_T (1 - C_T)} & U_m &= \frac{17032.5}{79.45(1 - 0.01785)} & U_m &= 218.276 \text{ cm / seg} \end{aligned}$$

### CALCULO DE LA VISCOSIDAD EFECTIVA

$$K = \frac{0.511^{1-n} (R_6 - R_3)}{2^n - 1}$$
$$\frac{R_{100} - R_3}{R_6 - R_3} = \frac{33.333^n - 1}{2^n - 1}$$

$$\tau_0 = 0.511 \left[ R_3 - \frac{R_6 - R_3}{2^n - 1} \right]$$

$$\gamma = \left[ \frac{2.4(Q)}{A_m(D_{OH} - D_{TP})} \right] \left[ \frac{2n+1}{3n} \right]^{\frac{n}{n-1}}$$

$$\mu_e = 10 \left[ \frac{\tau_0}{\gamma} + K\gamma^{n-1} \right]$$

### CALCULO DE LA VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO

$$v_s = 120 \left( \frac{\mu_e}{10d_p \rho_f} \right) \left[ \sqrt{1 + 0.0727 d_p \left( \frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right) \left( \frac{10d_p \rho_f}{\mu_e} \right)^2} - 1 \right]$$

$$v_s = 120 \left( \frac{1.78408}{10 * 0.254 * 1.37} \right) \left[ \sqrt{1 + 0.0727 * 0.254 \left( \frac{1.8}{1.37} - 1 \right) \left( \frac{10 * 0.254 * 1.37}{1.78408} \right)^2} - 1 \right]$$

$$v_s = 0.6746 \text{ cm / seg}$$

### CALCULO DE $C_D$ y $C_L$

$$C_D = \left( \frac{30\mu_e}{d_p v_s \rho_L} \right) + 1.25$$

$$C_D = \left( \frac{30 * 1.78408}{0.254 * 0.6746 * 1.37} \right) + 1.25 \quad C_D = 229.25$$

$$C_L = 0.09 \quad \text{Dato}$$

### SISTEMA DE ECUACIONES

El sistema de cinco ecuaciones con cinco incógnitas es:

$$U_S A_S C_S + U_B A_B C_B = U_m A_m C_m \quad (6.1)$$

$$U_S A_S (1 - C_S) + U_B A_B (1 - C_B) = U_m A_m (1 - C_m) \quad (6.2)$$

$$A_S \left[ \frac{\Delta P}{\Delta L} \right] = S_S \tau_S + S_i \tau_i + A_S \rho_S g \text{Sen} \theta \quad (6.3)$$

$$A_B \left[ \frac{\Delta P}{\Delta L} \right] = -S_B \tau_B + S_i \tau_i - A_B \rho_B g \text{Sen} \theta - \frac{F_{cont}}{L} \quad (6.4)$$

$$C_S = \frac{\left[ 2 \int_{-r_{ext}+h_B}^{r_{ext}} \sqrt{r_{ext}^2 - y^2} dy - 2 \int_{-r_{int}}^{r_{int}} \sqrt{r_{int}^2 - y^2} dy \right] * \frac{C_B \left[ e^{-\left[ \frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p} \right] y} - e^{-\left[ \frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p} \right] r_{ext}} \right]}{\left[ e^{-\left[ \frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p} \right] (-r_{ext}+h_B)} - e^{-\left[ \frac{v_p \text{Sen} \alpha}{\varepsilon_p} \right] r_{ext}} \right]}}{r_{ext}^2 \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) - \text{sen}^{-1} \left( \frac{h_B}{r_{ext}} - 1 \right) \right] - (h_B - r_{ext}) \sqrt{2h_B r_{ext} - h_B^2} - \pi r_{int}^2} \quad (6.5)$$

Las incógnitas son  $h_B$ ,  $C_S$ ,  $U_B$ ,  $U_S$ , y  $\left[ \frac{\Delta P}{L} \right]$ .

Inicialmente se calcula  $C_S$  de las ecuaciones (6.1) y (6.2) (Capítulo 6), con el fin de poder comparar este valor con  $C_S$  de la ecuación (6.5).

$$U_S A_S C_S + U_B A_B C_B = U_m A_m C_m \quad (6.1)$$

$$U_S A_S (1 - C_S) + U_B A_B (1 - C_B) = U_m A_m (1 - C_m) \quad (6.2)$$

Sumando las ecuaciones (6.1) y (6.2)

$$U_S A_S + U_B A_B = U_m A_m$$

$$\text{Despejando } U_S \quad U_S = \frac{U_m A_m - U_B A_B}{A_S}$$

$$A_m = A_S + A_B$$

$$A_B = A_m - A_S$$



$$U_S = \frac{U_m A_m - U_B (A_m - A_S)}{A_S}$$

De la ecuación (6.1) se despeja  $C_S$

$$C_S = \frac{U_m A_m C_m - U_B A_B C_B}{U_S A_S}$$

Sustituyendo  $U_S$  y  $A_B$

$$C_S = \frac{U_m A_m C_m - U_B (A_m - A_S) C_B}{U_m A_m - U_B (A_m - A_S)}$$

Para obtener un primer valor se iguala  $U_B = U_{\min B}$ , quedando  $U_B$  solo en función de la altura de la cama de recortes y se sustituye en  $U_S$

$$U_{\min B} = \sqrt{\frac{16(g)^* r_P}{3[(\sqrt{3})C_D + C_L]} \left[ \frac{\rho_P}{\rho_L} - 1 \right] \left[ \text{Sen} \left( \frac{\pi}{6} + \theta \right) + \frac{1}{2} C_B \left( \frac{h_B}{D_P} - 1 \right) \text{Cos} \theta \right]}$$

$$U_B = U_{\min B}$$

Entonces

$$C_B = 0.52$$

$$U_B = \sqrt{\frac{16(g)^* r_P}{3[(\sqrt{3})C_D + C_L]} \left[ \frac{\rho_P}{\rho_L} - 1 \right] \left[ \text{Sen} \left( \frac{\pi}{6} + \theta \right) + \frac{1}{2} C_B \left( \frac{h_B}{D_P} - 1 \right) \text{Cos} \theta \right]}$$

$$U_B = \sqrt{\frac{16(982)^* 0.127}{3[(\sqrt{3})^* 229.25 + 0.09]} \left[ \frac{1.80}{1.37} - 1 \right] \left[ \text{Sen} \left( \frac{180}{6} + 82.5 \right) + \frac{1}{2} 0.52 \left( \frac{h_B}{0.254} - 1 \right) \text{Cos}(82.5) \right]}$$

$$\text{Si } h_B = 0.6 \quad \Rightarrow \quad U_B = 0.714095$$

$$C_S = \frac{U_m A_m C_m - 0.52 U_B (A_m - A_S)}{U_m A_m - U_B (A_m - A_S)}$$

Ecuación F

Hasta aquí se calculará  $C_S$  en función de  $h_B$ .

Tomando en cuenta la concentración de la suspensión en base a la exponencial (ecuaciones **(6.5)**), se desglosará el término  $\frac{v_p}{\varepsilon_p}$ :

$$v_p = v_s(1 - 4C_s + 8C_s^2)$$

sustituyendo  $v_s$ :  $v_p = 0.6746(1 - 4C_s + 8C_s^2)$

$$\varepsilon_p = 0.014\varepsilon_0 d_p U_s [\text{Re}_s]^{1/3}$$

$$\varepsilon_0 = 1.24 \left( \frac{C_s}{0.12} \right)^{0.5}$$

$$\frac{v_p}{\varepsilon_p} = \frac{v_s(1 - 4C_s + 8C_s^2)}{0.014 \left[ 1.24 \left( \frac{C_s}{0.12} \right)^{0.5} \right] d_p U_s \left[ \frac{4A_s U_s \rho_s}{\mu_e S_s} \right]^{1/3}}$$

$$\frac{v_p}{\varepsilon_p} = \frac{v_s(1 - 4C_s + 8C_s^2)}{0.01736 d_r U_s \left( \frac{C_s}{0.12} \right)^{0.5} \left[ \frac{4A_s U_s \rho_s}{\mu_e S_s} \right]^{1/3}}$$

En la ecuaciones **(6.5)** se sustituye  $\frac{v_p}{\varepsilon_p}$ , se realiza la integral y se itera en  $C_s$

Ecuación F dándole valores a  $h_B$ , estos dos valores de  $C_s$  y  $h_B$ , se sustituyen en la ecuaciones **(6.5)** y cuando al sustituir el valor de la cama de recortes no varía en las dos ecuaciones (ecuaciones **(6.5)** y **F**), entonces ese valor será el correcto de la altura de la cama de recortes  $h_B$ .

Si  $h_B$  es mayor al diámetro del recorte, entonces existe una cama de recorte.

$$h_B \geq d_r$$

En este punto tenemos calculado hasta el momento cuatro de las cinco incógnitas, las cuales son;  $h_B$ ,  $C_s$ ,  $U_B$  y  $U_s$

---

## CALCULO EL AREA DE LA SUSPENSION Y LOS PERIMETROS CASO I

Ya con el valor de la altura de la cama de recortes  $h_B$  obtenido de la iteración se procede a calcular los parámetros restantes.

$$A_S = r_{ext}^2 \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) - \text{sen}^{-1} \left( \frac{h_B}{r_{ext}} - 1 \right) \right] - (h_B - r_{ext}) \sqrt{2h_B r_{ext} - h_B^2} - \pi r_{int}^2$$

$$A_S = 7.62^2 \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) - \text{sen}^{-1} \left( \frac{0.6}{7.62} - 1 \right) \right] - (0.6 - 7.62) \sqrt{2 * 0.6 * 7.63 - 0.6^2} - \pi * 5.715^2$$

$$A_S = 77.4161$$

$$S_T = S_B + S_S$$

$$S_T = 2\pi(r_{ext} + r_{int})$$

$$S_T = 2\pi(7.62 + 5.715)$$

$$S_T = 83.7865$$

El perímetro de la cama de recortes es:

$$S_B = r_{ext} * \frac{\pi}{90} * \text{Cos}^{-1} \left| \frac{r_{ext} - h_B}{r_{ext}} \right|$$

$$S_B = 7.62 * 2 * \text{Cos}^{-1} \left| \frac{7.62 - 0.6}{7.62} \right|$$

$$S_B = 6.0882$$

El perímetro de la suspensión es:

$$S_S = 2\pi(r_{ext} + r_{int}) - r_{ext} * \frac{\pi}{90} * \text{Cos}^{-1} \left| \frac{-r_{ext} + h_B}{r_{ext}} \right|$$

$$S_S = 2\pi(7.62 + 5.715) - 5.715 * 2 * \text{Cos}^{-1} \left| \frac{7.62 - 0.6}{7.62} \right| \quad S_S = 77.6983$$

---


$$\theta_1 = \text{Cos}^{-1} \left| \frac{r_{ext} - h_B}{r_{ext}} \right| \quad \theta_1 = \text{Cos}^{-1} \left| \frac{7.62 - 0.6}{7.62} \right| \quad \theta_1 = 0.399489$$

El perímetro de la interfase es:

$$S_i = \frac{\pi}{90} * r_{ext} * \text{Sen} \theta_1 \quad S_i = 2 * 7.62 * \text{Sen}(0.399489) \quad S_i = 5.92756$$

## SE CALCULA EL DIÁMETRO HIDRÁULICO DE CADA SECCIÓN

Diámetro hidráulico de una corona

$$D_h = D_{pozo} - D_{tub} \quad D_h = 15.24 - 11.43 \quad D_h = 3.81 \text{cm}$$

El diámetro hidráulico de la cama de arena  $D_{hB}$  es:

$$D_{hB} = \frac{4A_{SeccionTransversalCama}}{S_{MojadoB}} \quad D_{hB} = \frac{4(2.3906)}{6.0882} \quad D_{hB} = 1.57064 \text{cm}$$

El diámetro hidráulico de la suspensión  $D_{hS}$  es:

$$D_{hS} = \frac{4A_{SeccionTransversalSusp}}{S_{MojadoSusp}} \quad D_{hS} = \frac{4(77.4161 \text{cm}^2)}{77.6983 \text{cm}} \quad D_{hS} = 3.98547 \text{cm}$$

## SE CALCULA EL NUMERO DE REYNOLDS

Número de Reynolds total:

$$\text{Re} = \frac{D_h U_m \rho_m}{\mu_e}$$

Número de Reynolds de la suspensión

$$\text{Re}_s = \frac{D_{hS} U_s \rho_s}{\mu_e} \quad \text{Re}_s = \frac{3.98547 * 223.9891 * 1.3765}{1.78408} \quad \text{Re}_s = 689.361$$

$$\rho_s = \rho_r C_s + \rho_L (1 - C_s) \quad \rho_s = 1.8 * 0.0178 + 1.37(1 - 0.0178) \quad \rho_s = 1.37765$$

---

Número de Reynolds de la cama de arena

$$\text{Re}_B = \frac{D_{hB} U_B \rho_B}{\mu_e} \quad \text{Re}_B = \frac{1.57064 * 0.7080 * 1.5936}{1.78408} \quad \text{Re}_B = 0.993287$$

$$\rho_B = \rho_r C_B + \rho_L (1 - C_B) \quad \rho_B = 1.80 * 0.52 + 1.37(1 - 0.52) \quad \rho_B = 1.5936 \text{ gr/cm}^3$$

**SE CALCULAN LOS ESFUERZOS DE INTERFACE, SUSPENSIÓN Y DE LA CAMA**

$$f_s = 0.00454 + 0.645 \text{Re}_s^{-0.7} \quad f_s = 0.00454 + 0.645(689.3387^{-0.7}) \quad f_s = 0.011187$$

$$\tau_s = \frac{1}{2} f_s \rho_s U_s^2 \quad \tau_s = \frac{1}{2} * 0.011187 * 1.3777 * 223.9891^2 \quad \tau_s = 386.627$$

Se procede a calcular los parámetros interfase

$$f_i = 0.966368 \text{Re}_s^{-1.07116} n^{2.360211} \left( \frac{d_r}{D_{hS}} \right)^{-2.34539}$$

$$\frac{R_{100} - R_3}{R_6 - R_3} = \frac{33.333^n - 1}{2^n - 1} \quad n = 0.785$$

$$f_i = 0.966368(689.3387^{-1.07116})(0.785^{2.360211}) \left( \frac{0.254}{3.98547} \right)^{-2.34539} \quad f_i = 0.3168$$

$$\tau_i = \frac{1}{2} f_i \rho_s [U_s^2 - U_B^2] \quad \tau_i = \frac{1}{2} (0.3168) * 1.3777 * [223.9891^2 - 0.7080^2] \quad \tau_i = 10948.6$$

Posteriormente se procede a calcular los parámetros de la cama de recortes

$$f_B = 0.046 \text{Re}_B^{-0.2} \quad f_B = 0.046(0.9933^{-0.2}) \quad f_B = 0.046062$$

$$\tau_B = \frac{1}{2} f_B \rho_B U_B^2 \quad \tau_B = \frac{1}{2} (0.046062) * 1.5936 * 0.7080^2 \quad \tau_B = 0.018397$$

---

## FUERZA DE CONTACTO (NORMAL) Y FUERZA MAXIMA DE LA CAMA DE RECORTES

Se calcula el gradiente de presión por unidad de longitud  $\left[ \frac{\Delta P}{L} \right]$

$$A_S \left[ \frac{\Delta P}{L} \right] = -S_S \tau_S - S_i \tau_i - A_S \rho_S g \text{Sen} \theta \quad \left[ \frac{\Delta P}{L} \right] = \frac{S_S \tau_S + S_i \tau_i + A_S \rho_S g \text{Sen} \theta}{A_S}$$

$$\left[ \frac{\Delta P}{L} \right] = \frac{77.6983 * 386.627 + 5.92756 * 10948.6 + 77.4161 * 1.37765 * 982 * \text{Sen}(82.5)}{981 * 77.4161 * 10}$$

$$\left[ \frac{\Delta P}{L} \right] = 0.2614 \frac{\text{Kgrf} / \text{cm}^2}{\text{m}} \quad \left[ \frac{\Delta P}{L} \right] = 2.614 \frac{\text{grf} / \text{cm}^2}{\text{cm}}$$

Se calcula la Fuerza de contacto  $\frac{F_{cont}}{L}$  de la cama de recortes

$$\frac{F_{cont}}{L} = -A_B \left[ \frac{\Delta P}{L} \right] - S_B \tau_B + S_i \tau_i - A_B \rho_B g \text{Sen} \theta$$

$$\frac{F_{cont}}{L} = -2.3906 [2.614] - 77.6983 * 386.627 + 5.92756 * 10948.6 - 2.3906 * 1.57936 * 982 * \text{Sen}(82.5)$$

$$\frac{F_{cont}}{L} = 61191.8$$

Se calcula la Fuerza Máxima  $\frac{F_{Max}}{L}$ :  $\frac{F_{Max}}{L} = 0.15 \left[ C_B A_B (\rho_r - \rho_L) g \text{Sen} \alpha + \frac{\tau_i S_i}{0.6} \right]$

$$\frac{F_{Max}}{L} = 0.15 \left[ 0.52 * 2.3906 (1.80 - 1.37) * 982 * \text{Sen}(82.5) + \frac{10950 * 5.9276}{0.6} \right]$$

$$\frac{F_{Max}}{L} = 16304.9$$

Si  $\frac{F_{cont}}{L} > \frac{F_{Max}}{L}$  La cama de arena se encuentra en movimiento, por lo tanto se toma el valor de la velocidad de la cama de arena calculado de las ecuaciones (6.1) y (6.2), procediendo a un nuevo cálculo.

---

## APENDICE B

### CÓDIGO DEL PROGRAMA DE CÓMPUTO DEL MODELO HIDRÁULICO

Se realizó el programa de cómputo en Matlab 7, cuyo código es el siguiente:

```
clear;
clc;
%clf;
Qfluido=270; %gal/min 15 con 5 bl/min capa de 2.11 cm erosiona la capa de 15
%gal/min 1.41 a 30 grl/min 0.98
ROP=1.0 ;%m/min; 1.0 (15 gal/min) 4.6 erosiona la capa de arena con 3.2
erosiona
DExtTP=4.5; %pg 1.9 con 3.8 erosiona la capa hasta 0.37 cm de capa
Bna=6; %pg 5.012
%AngPozo=1:1:89
AngPozo=82.5; %grados 70 erosiona la capa con 16 grados
DensRec=2.52; %gr/cc 2.65 lutita petrolifera 1.8
DensLiq=1.37;%gr/cc 1.37 1.32 erosiona la capa con 2.15
g=981; %cm/seg2
DiamRec=0.2; %pg 0.5 0.1
Ccama=0.52;
nn=0.785 %adimensional
ViscEf=2.24;%poise 2.24 3.856 erosiona la capa con 24
poro=0.20; %porosidad
%convirtiendo al sistema CGS
Qf=Qfluido*63.0833; %cm3/seg
Urop=1.6667*ROP ; %cm/sg
Rint=2.54*DExtTP/2 ; %cm
Rext=2.54*Bna/2 ; %cm
DiamP=2.54*DiamRec; %cm
%Calculo Aa,Ct,Ut
Aa=(3.1416*(Rext^2-Rint^2)); %cm2
Ct=(3.1416*(Urop*Rext^2)/Qf) %adimensional
%Ct=(3.1416*Urop*Rext*Rext*(1-poro))/(Qf+3.1416*Urop*Rext*Rext*(1-poro))

Ut=(Qf/(Aa*(1-Ct))); %cm/sg
%Calculo la velocidad de asentamiento de la partícula cm/seg
Vs=(12*ViscEf/(DiamP*DensLiq))*(((1+0.0727*DiamP*((DensRec/DensLiq)-
1))*((10*DiamP*DensLiq)/ViscEf)^2)^0.5)-1)
%Numero de Reynolds de la partícula
Rep=DiamP*Vs*DensLiq/ViscEf
%%%If Rep < 100 then
%%%Si fuera mayor que 100 quiere de cir que no existe cama de recortes
%%%Else
```

---

```

%%end
%Calculo Cd
CD=1.25+(30*ViscEf/(DiamP*Vs*DensLiq))
CL=0.09
%Calculo el area de la suspensión caso I
Dif=Rext-Rint;
%Tol=0.01
H=0.0:0.001:Dif; %como primer valor, despues lo voy a iterar
%%for H=0:Dif
%%H=H+0.01
Asusp=(Rext.^2).*(1.5708-asin((H./Rext)-1))-(H-Rext).*((2.*H.*Rext-H.*H).^0.5)-
3.1416*Rint*Rint;
PerSusp=6.2832*(Rext-Rint)-Rext*(2*acos((Rext-H)./Rext));
%Calculo de la Velocidad de la cama de recortes asumo que tiene la minima
Teta1=(90-AngPozo).*(3.1416/180);
Ucama=(((2.66667*g.*DiamP)./(1.73205*CD+CL)).*((DensRec./DensLiq)-
1).*(sin(0.5236+Teta1)+0.26*((H./DiamP)-1)).*cos(Teta1)).^0.5;
%Calculo Cs
Cs=((Aa.*Ut.*Ct-(0.52*Ucama.*(Aa-Asusp))))/(Aa.*Ut-Ucama.*(Aa-Asusp));
Us=(Aa.*Ut-Ucama.*(Aa-Asusp))./Asusp;
%C(Y)=Ccama*Exp[-(Vn*Sin(Alfa)/Ep)*(Y-Yb)]
%Calculo la velocidad de asentamiento
%Vs2=32.355*(DiamP*((DensRec/DensLiq)-1))^0.5
Vn=Vs.*(1-4.*Cs+8.*Cs.*Cs);
%Calculo Eo Se toma la correlación Eo para el caso de que Cs<=0.05 que es el
%caso de perforacion
%Eo=1.24*(Cs/0.12)^0.5
Eo=(Cs./0.12).^0.25;
%Ep=0.014*Eo*Dp*Ususp*(#Rnsusp)^(1/3)
DiamHid=4.*Asusp./PerSusp;
DensSusp=DensRec.*Cs+(DensLiq.*(1-Cs));
NumRsusp=DiamHid.*Us.*DensSusp./viscEf;
NRel=NumRsusp.^(1/3);
Ep=0.014*Eo.*DiamP.*Us.*NRel;
Alfa=AngPozo.*(3.1416/180);
Beta=((Vn.*sin(Alfa))./Ep);

Esp=(2.*Rext-H)./20;
Y0=H-Rext;
FY0=((Rext.*Rext-Y0.*Y0).^0.5).*(1-exp(-Beta.*Y0))./(exp(-Beta.*Rext)-exp(-
Beta.*(H-Rext)));
Y1=(H-Rext)+Esp;
FY1=((Rext.*Rext-Y1.*Y1).^0.5).*(1-exp(-Beta.*Y1))./(exp(-Beta.*Rext)-exp(-
Beta.*(H-Rext)));
Y2=(H-Rext)+2*Esp;
FY2=((Rext.*Rext-Y2.*Y2).^0.5).*(1-exp(-Beta.*Y2))./(exp(-Beta.*Rext)-exp(-
Beta.*(H-Rext)));

```

---



---

$Y3=(H-Rext)+3*Esp;$   
 $FY3=((Rext.*Rext-Y3.*Y3).^0.5).*(1-exp(-Beta.*Y3))./(exp(-Beta.*Rext)-exp(-Beta.*(H-Rext)));$   
 $Y4=(H-Rext)+4*Esp;$   
 $FY4=((Rext.*Rext-Y4.*Y4).^0.5).*(1-exp(-Beta.*Y4))./(exp(-Beta.*Rext)-exp(-Beta.*(H-Rext)));$   
 $Y5=(H-Rext)+5*Esp;$   
 $FY5=((Rext.*Rext-Y5.*Y5).^0.5).*(1-exp(-Beta.*Y5))./(exp(-Beta.*Rext)-exp(-Beta.*(H-Rext)));$   
 $Y6=(H-Rext)+6*Esp;$   
 $FY6=((Rext.*Rext-Y6.*Y6).^0.5).*(1-exp(-Beta.*Y6))./(exp(-Beta.*Rext)-exp(-Beta.*(H-Rext)));$   
 $Y7=(H-Rext)+7*Esp;$   
 $FY7=((Rext.*Rext-Y7.*Y7).^0.5).*(1-exp(-Beta.*Y7))./(exp(-Beta.*Rext)-exp(-Beta.*(H-Rext)));$   
 $Y8=(H-Rext)+8*Esp;$   
 $FY8=((Rext.*Rext-Y8.*Y8).^0.5).*(1-exp(-Beta.*Y8))./(exp(-Beta.*Rext)-exp(-Beta.*(H-Rext)));$   
 $Y9=(H-Rext)+9*Esp;$   
 $FY9=((Rext.*Rext-Y9.*Y9).^0.5).*(1-exp(-Beta.*Y9))./(exp(-Beta.*Rext)-exp(-Beta.*(H-Rext)));$   
 $Y10=(H-Rext)+10*Esp;$   
 $FY10=((Rext.*Rext-Y10.*Y10).^0.5).*(1-exp(-Beta.*Y10))./(exp(-Beta.*Rext)-exp(-Beta.*(H-Rext)));$   
 $Y11=(H-Rext)+11*Esp;$   
 $FY11=((Rext.*Rext-Y11.*Y11).^0.5).*(1-exp(-Beta.*Y11))./(exp(-Beta.*Rext)-exp(-Beta.*(H-Rext)));$   
 $Y12=(H-Rext)+12*Esp;$   
 $FY12=((Rext.*Rext-Y12.*Y12).^0.5).*(1-exp(-Beta.*Y12))./(exp(-Beta.*Rext)-exp(-Beta.*(H-Rext)));$   
 $Y13=(H-Rext)+13*Esp;$   
 $FY13=((Rext.*Rext-Y13.*Y13).^0.5).*(1-exp(-Beta.*Y13))./(exp(-Beta.*Rext)-exp(-Beta.*(H-Rext)));$   
 $Y14=(H-Rext)+14*Esp;$   
 $FY14=((Rext.*Rext-Y14.*Y14).^0.5).*(1-exp(-Beta.*Y14))./(exp(-Beta.*Rext)-exp(-Beta.*(H-Rext)));$   
 $Y15=(H-Rext)+15*Esp;$   
 $FY15=((Rext.*Rext-Y15.*Y15).^0.5).*(1-exp(-Beta.*Y15))./(exp(-Beta.*Rext)-exp(-Beta.*(H-Rext)));$   
 $Y16=(H-Rext)+16*Esp;$   
 $FY16=((Rext.*Rext-Y16.*Y16).^0.5).*(1-exp(-Beta.*Y16))./(exp(-Beta.*Rext)-exp(-Beta.*(H-Rext)));$   
 $Y17=(H-Rext)+17*Esp;$   
 $FY17=((Rext.*Rext-Y17.*Y17).^0.5).*(1-exp(-Beta.*Y17))./(exp(-Beta.*Rext)-exp(-Beta.*(H-Rext)));$   
 $Y18=(H-Rext)+18*Esp;$

---

---

$FY18 = ((Rext \cdot Rext - Y18 \cdot Y18)^{0.5} \cdot (1 - \exp(-Beta \cdot Y18)) / (\exp(-Beta \cdot Rext) - \exp(-Beta \cdot (H - Rext))))$ ;  
 $Y19 = (H - Rext) + 19 \cdot Esp$ ;  
 $FY19 = ((Rext \cdot Rext - Y19 \cdot Y19)^{0.5} \cdot (1 - \exp(-Beta \cdot Y19)) / (\exp(-Beta \cdot Rext) - \exp(-Beta \cdot (H - Rext))))$ ;  
 $Y20 = Rext$ ;  
 $FY20 = ((Rext \cdot Rext - Y20 \cdot Y20)^{0.5} \cdot (1 - \exp(-Beta \cdot Y20)) / (\exp(-Beta \cdot Rext) - \exp(-Beta \cdot (H - Rext))))$ ;

$INT1 = (Esp / 2) \cdot (FY0 + 2 \cdot FY1 + 2 \cdot FY2 + 2 \cdot FY3 + 2 \cdot FY4 + 2 \cdot FY5 + 2 \cdot FY6 + 2 \cdot FY7 + 2 \cdot FY8 + 2 \cdot FY9 + 2 \cdot FY10 + 2 \cdot FY11 + 2 \cdot FY12 + 2 \cdot FY13 + 2 \cdot FY14 + 2 \cdot FY15 + 2 \cdot FY16 + 2 \cdot FY17 + 2 \cdot FY18 + 2 \cdot FY19 + FY20)$ ;

$Esp2 = Rint / 10$ ;  
 $YA0 = -Rint$ ;  
 $FYA0 = ((Rint \cdot Rint - YA0 \cdot YA0)^{0.5} \cdot (1 - \exp(-Beta \cdot YA0)) / (\exp(-Beta \cdot Rext) - \exp(-Beta \cdot (H - Rext))))$ ;  
 $YA1 = -Rint + Esp2$ ;  
 $FYA1 = ((Rint \cdot Rint - YA1 \cdot YA1)^{0.5} \cdot (1 - \exp(-Beta \cdot YA1)) / (\exp(-Beta \cdot Rext) - \exp(-Beta \cdot (H - Rext))))$ ;  
 $YA2 = -Rint + 2 \cdot Esp2$ ;  
 $FYA2 = ((Rint \cdot Rint - YA2 \cdot YA2)^{0.5} \cdot (1 - \exp(-Beta \cdot YA2)) / (\exp(-Beta \cdot Rext) - \exp(-Beta \cdot (H - Rext))))$ ;  
 $YA3 = -Rint + 3 \cdot Esp2$ ;  
 $FYA3 = ((Rint \cdot Rint - YA3 \cdot YA3)^{0.5} \cdot (1 - \exp(-Beta \cdot YA3)) / (\exp(-Beta \cdot Rext) - \exp(-Beta \cdot (H - Rext))))$ ;  
 $YA4 = -Rint + 4 \cdot Esp2$ ;  
 $FYA4 = ((Rint \cdot Rint - YA4 \cdot YA4)^{0.5} \cdot (1 - \exp(-Beta \cdot YA4)) / (\exp(-Beta \cdot Rext) - \exp(-Beta \cdot (H - Rext))))$ ;  
 $YA5 = -Rint + 5 \cdot Esp2$ ;  
 $FYA5 = ((Rint \cdot Rint - YA5 \cdot YA5)^{0.5} \cdot (1 - \exp(-Beta \cdot YA5)) / (\exp(-Beta \cdot Rext) - \exp(-Beta \cdot (H - Rext))))$ ;  
 $YA6 = -Rint + 6 \cdot Esp2$ ;  
 $FYA6 = ((Rint \cdot Rint - YA6 \cdot YA6)^{0.5} \cdot (1 - \exp(-Beta \cdot YA6)) / (\exp(-Beta \cdot Rext) - \exp(-Beta \cdot (H - Rext))))$ ;  
 $YA7 = -Rint + 7 \cdot Esp2$ ;  
 $FYA7 = ((Rint \cdot Rint - YA7 \cdot YA7)^{0.5} \cdot (1 - \exp(-Beta \cdot YA7)) / (\exp(-Beta \cdot Rext) - \exp(-Beta \cdot (H - Rext))))$ ;  
 $YA8 = -Rint + 8 \cdot Esp2$ ;  
 $FYA8 = ((Rint \cdot Rint - YA8 \cdot YA8)^{0.5} \cdot (1 - \exp(-Beta \cdot YA8)) / (\exp(-Beta \cdot Rext) - \exp(-Beta \cdot (H - Rext))))$ ;  
 $YA9 = -Rint + 9 \cdot Esp2$ ;  
 $FYA9 = ((Rint \cdot Rint - YA9 \cdot YA9)^{0.5} \cdot (1 - \exp(-Beta \cdot YA9)) / (\exp(-Beta \cdot Rext) - \exp(-Beta \cdot (H - Rext))))$ ;  
 $YA10 = -Rint + 10 \cdot Esp2$ ;  
 $FYA10 = ((Rint \cdot Rint - YA10 \cdot YA10)^{0.5} \cdot (1 - \exp(-Beta \cdot YA10)) / (\exp(-Beta \cdot Rext) - \exp(-Beta \cdot (H - Rext))))$ ;

---

```

YA11=-Rint+11*Esp2;
FYA11=((Rint*Rint-YA11.*YA11).^0.5).*(1-exp(-Beta.*YA11))./(exp(-Beta.*Rext)-
exp(-Beta.*(H-Rext)));
YA12=-Rint+12*Esp2;
FYA12=((Rint*Rint-YA12.*YA12).^0.5).*(1-exp(-Beta.*YA12))./(exp(-Beta.*Rext)-
exp(-Beta.*(H-Rext)));
YA13=-Rint+13*Esp2;
FYA13=((Rint*Rint-YA13.*YA13).^0.5).*(1-exp(-Beta.*YA13))./(exp(-Beta.*Rext)-
exp(-Beta.*(H-Rext)));
YA14=-Rint+14*Esp2;
FYA14=((Rint*Rint-YA14.*YA14).^0.5).*(1-exp(-Beta.*YA14))./(exp(-Beta.*Rext)-
exp(-Beta.*(H-Rext)));
YA15=-Rint+15*Esp2;
FYA15=((Rint*Rint-YA15.*YA15).^0.5).*(1-exp(-Beta.*YA15))./(exp(-Beta.*Rext)-
exp(-Beta.*(H-Rext)));
YA16=-Rint+16*Esp2;
FYA16=((Rint*Rint-YA16.*YA16).^0.5).*(1-exp(-Beta.*YA16))./(exp(-Beta.*Rext)-
exp(-Beta.*(H-Rext)));
YA17=-Rint+17*Esp2;
FYA17=((Rint*Rint-YA17.*YA17).^0.5).*(1-exp(-Beta.*YA17))./(exp(-Beta.*Rext)-
exp(-Beta.*(H-Rext)));
YA18=-Rint+18*Esp2;
FYA18=((Rint*Rint-YA18.*YA18).^0.5).*(1-exp(-Beta.*YA18))./(exp(-Beta.*Rext)-
exp(-Beta.*(H-Rext)));
YA19=-Rint+19*Esp2;
FYA19=((Rint*Rint-YA19.*YA19).^0.5).*(1-exp(-Beta.*YA19))./(exp(-Beta.*Rext)-
exp(-Beta.*(H-Rext)));
YA20=Rint;
FYA20=((Rint*Rint-YA20.*YA20).^0.5).*(1-exp(-Beta.*YA20))./(exp(-Beta.*Rext)-
exp(-Beta.*(H-Rext)));
INT2=(Esp2/2).*(FYA0+2*FYA1+2*FYA2+2*FYA3+2*FYA4+2*FYA5+2*FYA6+2*F
YA7+2*FYA8+2*FYA9+2*FYA10+2*FYA11+2*FYA12+2*FYA13+2*FYA14+2*FYA
15+2*FYA16+2*FYA17+2*FYA18+2*FYA19+FYA20);

%Csusp=[2*Ccama*Exp(Beta*Yb)/Asusp]*(Int(-Rext+H,Rext)*exp(-Beta*(y))dy-Int(-
Rint,Rint)*exp(-Beta*(y))dy)
%CONCENT=(2*Ccama*exp(Beta*H)/Asusp)*(INT1-INT2)
CONCENT=(2.*Ccama./Asusp).*(INT1-INT2);
%%Tol=0.01
%%if Cs<=(CONCENT+tol)
%Tol=0.2
%if Cs>=(CONCENT+Tol)
%AlturaH==H
%else
%AlturaH==H
%end
plot(CONCENT,H,Cs,H)

```

---

---

```

hold on
%Tol=abs(Cs-CONCENT)
Tol=abs(Cs-CONCENT);
print('varibales');
j=0; p=0;
for i=1:length(Cs)
    if Tol(i) < 0.0000455
        j=j+1;
        Punto(j)=Cs(i);
        h(j)=i;
        H(i)
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%if CONCENT<=Cs
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%55%Altura=H
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%print(H)
    else
        p=p+1;
        %Alturad==H
    end
end
plot(Punto(j),H(h),'or');
hold off

%end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%plot(H,H)
altura=ans
%end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%plot(H,H)
Stot=6.2832*(Rext+Rint)
angPer=acos((Rext-altura)/Rext)
Scama=2*Rext*(angPer) %cm
Sint=2*Rext*sin(angPer)
Ssusn=Stot-Scama
%PerSusp2=6.2832*(Rext+Rint)-Rext*(2*acos((Rext-altura)/Rext))
Atotal=(3.1416*(Rext^2-Rint^2))
Asuspn=(Rext^2)*(1.5708-asin((altura/Rext)-1))-(altura-Rext)*((2*altura*Rext-
altura*altura)^0.5)-3.1416*Rint*Rint
Acama=Atotal-Asuspn

Teta12=(90-AngPozo)*(3.1416/180);
Ucama2=(((2.66667*g*DiamP)/(1.73205*CD+CL))*((DensRec/DensLiq)-
1)*(sin(0.5236+Teta12)+0.26*((altura/DiamP)-1))*cos(Teta12))^0.5
%Calculo Cs
Cs2=((Atotal*Ut*Ct-(0.52*Ucama2*(Atotal-Asuspn)))/(Atotal*Ut-Ucama2*(Atotal-
Asuspn))
Us2=(Atotal*Ut-Ucama2*(Atotal-Asuspn))/Asuspn

DiamHidSusp=4*Asuspn/Ssusn

```

---

---

$DensSusp2 = DensRec * Cs2 + (DensLiq * (1 - Cs2))$   
 $RnSusp = DiamHidSusp * Us2 * DensSusp2 / ViscEf$   
 $ffSusp = 0.00454 + (0.645 * RnSusp^{(-0.7)})$   
 $TaoSusp = 0.5 * ffSusp * DensSusp2 * Us2 * Us2$

$DiamHidCama = 4 * Acama / Scama$   
 $DensCama = DensRec * Ccama + (DensLiq * (1 - Ccama))$   
 $RnCama = DiamHidCama * Ucama2 * DensCama / ViscEf$   
 $ffCama = 0.046 * RnCama^{(-0.2)}$   
 $TaoCama = 0.5 * ffCama * DensCama * Ucama2 * Ucama2$

$ffInt = 0.966368 * ((DiamHidSusp * Us2 * DensSusp2 / ViscEf)^{-1.07116}) * (nn^{2.360211}) * ((DiamP / DiamHidSusp)^{-2.34539})$

$\%ffInt = 0.966368 * ((DiamHidSusp * Us2 * DensSusp2 / ViscEf)^{-1.07116}) * (nn^{2.360211}) * ((DiamP / DiamHidSusp)^{(1)})$   
 $TaoInt = 0.5 * ffInt * DensSusp2 * (Us2 * Us2 - Ucama2 * Ucama2)$   
 $Alfa2 = AngPozo * (3.1416 / 180)$

$DPDL = ((Ssusn * TaoSusp) + (Sint * TaoInt) + (Asuspn * DensSusp2 * g * \sin(Alfa2))) / (981 * Asuspn)$     %grf/cm2/cm  
 $DPDLKg = DPDL / 10$                     %Kgf/cm2/m

$Fb = TaoInt * Sint - Acama * DPDL - TaoCama * Scama - DensCama * g * Acama * \cos(Alfa2)$   
 $Fbmax = 0.15 * ((Ccama * Acama * g * (DensRec - DensLiq) * \sin(Alfa2)) + (Sint * TaoInt / 0.6))$

**Los resultados que arroja el programa son los siguientes:**

Ct =  
0.0179  
Vs = 5.4014  
Rep = 1.6782  
CD = 19.1262  
CL = 0.0900  
ans = 1.6980  
altura = 1.6980  
Stot = 83.7865  
angPer = 0.6806  
Scama = 10.3731  
Sint = 9.5905  
Ssusn = 73.4134  
Atotal = 79.8066  
Asuspn = 68.6824  
Acama = 11.1242  
Ucama2 = 6.3677  
Cs2 = 0.0158

Us2 = 251.4649  
DiamHidSusp = 3.7422  
DensSusp2 = 1.3882  
RnSusp = 583.1748  
ffSusp = 0.0120  
TaoSusp = 527.2527  
DiamHidCama = 4.2896  
DensCama = 1.9680  
RnCama = 23.9983  
ffCama = 0.0244  
TaoCama = 0.9720  
ffInt = 0.0643  
TaoInt = 2.8220e+003  
Alfa2 = 1.4399  
DPDL = 2.3525  
DPDLKg = 0.2352  
Fb = 2.4225e+004  
Fbmax = 7.7367e+003

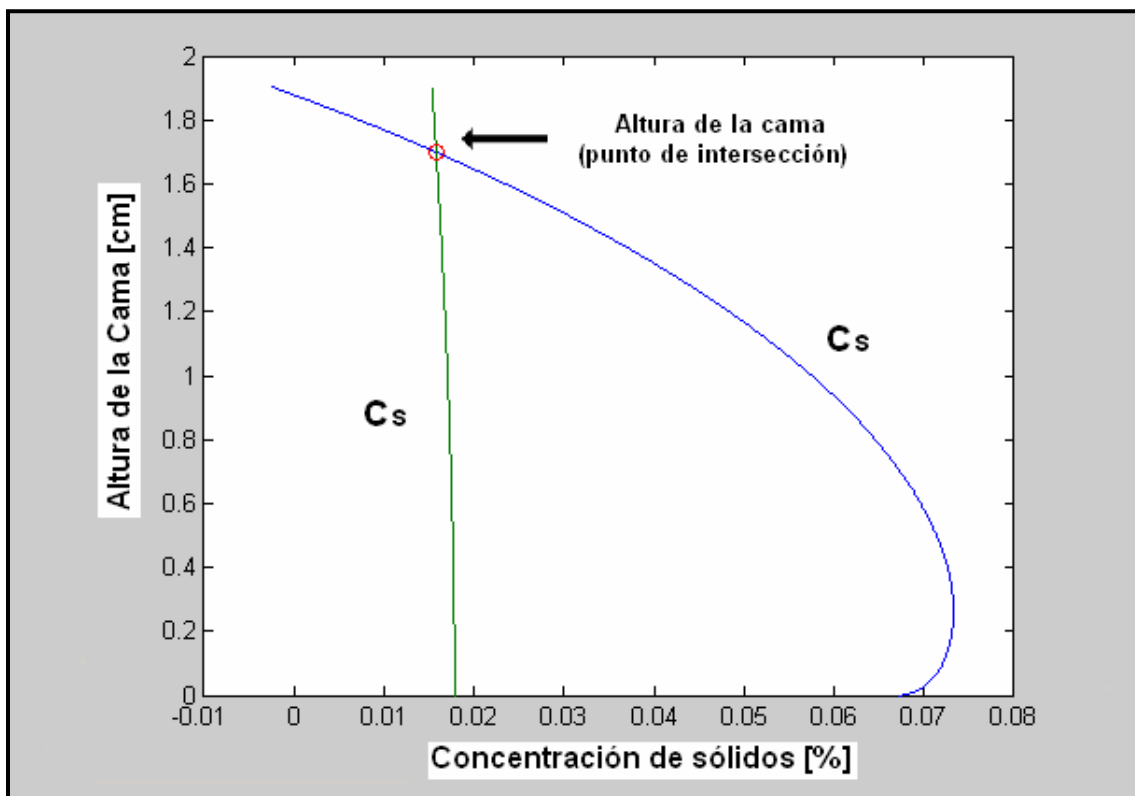


Figura B. Gráfica de resultados de salida del programa de cómputo.

---

## **BIBLIOGRAFÍA**

### **REFERENCIAS CAPITULO 1**

1. Revista- Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración, Delegación Veracruz, Mayo-Julio 2005, Número 4.
2. A.E. Guzmán y M. Yañez Mondragón, "The Rejuvenation of two gas basins in Mexico: Burgos and Veracruz", SPE 39839, 1998 SPE International Petroleum Conference and Exhibition of Mexico, Villahermosa, México, Marzo 3-5, 1998.
3. Boletín de prensa 06/2007 PEMEX, Gerencia de Comunicación Social, Subgerencia de Información.
4. A.E. Guzmán, J.A. Fernández Venegas, J.M. Riaño, R. Vázquez y R. Aguilar Razo, "Arquimia Field: Mexico's Highest-Deliverability Gas Well", SPE 98285, 2006 SPE Internacional Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, LA, Febrero 15-17, 2006.

### **REFERENCIAS CAPITULO 2**

1. Herald Blikra, K.E. Drevdal y T.V. Arrestad, "Extended Reach, Horizontal, and Complex Design Wells: Challenges, Achievements and Cost-Benefits", SPE 28005, 14 th World Petroleum Congress, Stavanger, Norway, Mayo 29-Junio 1º, 1994.
2. S. Modi, C.J. Mason, P.J. Tooms y G. Conran, "Meeting the 10Km Drilling Challenge", SPE 38583, 1997 SPE Annual Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, Octubre 5-8, 1997.
3. C.J. Mason y A. Judzis, "Extended-Reach Drilling – What es the Limit?", SPE 48943, 1998 SPE Annual Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, Septiembre 27-30, 1998.
4. M.L. Payne. B.S. Wilton y G.G. Ramos, "Recent Advances and Emerging Technologies for Extended Reach Drilling", SPE 29920, International Meeting on Petroleum Engineering, Beijing, RP China, Noviembre 14-17, 1995.
5. G. John Guild, Mahohar Lal, "Designing and Drilling Extended Reach Wells", Petroleum Engineer International, Febrero, 1995.

---

### REFERENCIAS CAPITULO 3

1. Frank Allen, Raul Tooms, Greg Conran, Hill Lesso y Patrick Vande Slijke, "Extended-Reach Drilling: Breaking the 10Km Barrier", Oilfield Review, Invierno 1997.
2. D.A. Cooking, P.N. Bezant y P.J. Tooms, "Pushing the ERD envelope at Wytch Farm", SPE/IADC 37618, 1997 SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Holanda, Marzo 4-6, 1997.
3. Tony Meader, Frank Allen, Graham Riley, "To the Limit and Beyond – The Secret of World-Class Extended-Reach Drilling Performance at Wytch Farm", IADC/SPE 59204, 2000 IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, Febrero 23-25, 2000.
4. Zhang Ming Jiang, "Case History on Planning, Drilling and Completing the World Record ERW – XJ 24-3 A-14", IADC/SPE 47785, 1998 IADC/SPE Asia Pacific Drilling Conference, Jakarta, Indonesia, Septiembre 7-9, 1998.
5. Brian Kelly Talkington, Dennis R. Morgan y Zhang Ming Jiang, "Drilling a World Record ERW in the South China Sea", SPE 48893, 1998 SPE International Conference and Exhibition in China, Beijing-China, Noviembre 2-6, 1998.
6. Zhang Ming Jiang y Zhang Wu Nian, "Critical Aspects Experienced in Drilling a World Record Extended Reach Well in South China Sea", SPE 50876, 1998 SPE International conference and Exhibition in China, Beijing, China, Noviembre 2-6, 1998.

### REFERENCIAS CAPITULO 4

1. Williams, C.E., Bruce, G.H., "Carrying capacity of drilling muds", Trans AIME, 1951.
2. Sifferman, T.R., Becker, T.E., "Hole cleaning in full-scale inclined well bores", SPE 20422, 65<sup>th</sup> annual Technological conference of SPE, New Orleans, Septiembre, 1990.
3. John Mitchell, "Perforando sin problemas", Comercializadora Greco, S.A. de C.V., México 2004.



---

## REFERENCIAS CAPITULO 5

1. P. Vieira, S. Miska, T.Reed, E. Kuku, "Minimum Air and Water Flow Rates Required for Effective Cuttings Transport in High Angle and Horizontal Wells", IADC/SPE 74463, IADC/SPE Drilling Conference, Dalla, Texas, Febrero 26-28, 2002.
2. V.C. Kelessidis, G. Mpandelis, A. Koutroulis y T. Micalakis, "Significant parameters affecting efficient cuttings transport in horizontal and deviated wellbores in coil tubing drilling: a Critical Review", 1<sup>st</sup> International Symposium of the Faculty of Mines (ITU) on Earth Sciences and Engineering, Maslak- Estambul, Turkia, Mayo 16-18, 2002P.
3. P. Doron y D. Barnea, "Flor Patterns Maps for Solid-Liquid Flor in Pipes", Int. J. Multiphase Flow, Vol.22, No.2, pp.273-283, 1996.
4. P. Doron, D. Granica y D. Barnea, "Slurry flow in horizontal pipes- experimental and modeling", International Journal of multiphase flow, Vol.13, No.4, pp535-547, 1987.
5. M. Santana, A.L. Martins y A. Sales Jr, "Advances in the modeling of the stratified flow of drilled cuttings in high angle and horizontal wells", SPE 39890, International Petroleum conference and exhibitions of Mexico, Villahermosa, 3-5 Marzo, 1998.
6. D.Nguyen y S.S. Rahman, "A three-layer hydraulic program for effective cuttings transport and hole cleaning in highly deviated and horizontal wells", IADC/SPE 36383, 1996 IADC/SPE Asia Pacific Drilling technology, Kuala Lumpur, Malasia, 9-11 Septiembre 1996.

## REFERENCIAS CAPÍTULO 6

1. M. Santana, A.L. Martins y A. Sales Jr, "Advances in the modeling of the stratified flow of drilled cuttings in high angle and horizontal wells", **SPE 39890**, International Petroleum conference and exhibitions of Mexico, Villahermosa, 3-5 Marzo, 1998.
2. P. Doron, M.Simkhis y D. Barnea, "Flow of solid-liquid mixtures in inclined pipes", International Journal of multiphase flow, Vol.23, No.2, pp. 313-323, 1997.
3. Hyun Cho, Subhash N. Shah y Samuel O. Osisanya, "A three- layer modeling for cuttings transport with coiled tubing horizontal drilling", **SPE 63269**, 2000 SPE Annual Technical Conference and exhibitions, Dallas, Texas, 1-4 Octubre 2000.
4. J.M. Peden, J.T. Ford y M.B. Oyenyin, "Comprehensive experimental investigations of drilled cuttings transport in inclined wells including the effects of rotations and eccentricity", **SPE 20925**, Europec 90, La Haya, Holanda, 22-24 Octubre 1990.
5. John F. Douglas, Janusz M. Gasiorek, John A. Swaffield, "Fluid Mechanics", Pearson Prentice Hall, España 2001.

- 
6. Sze-Foo Chien, "Setting Velocity of Irregularly Shaped Particles", **SPE 26121**, 1994 SPE Annual Technology Conference and Exhibition, New Orleans, September 25-28, 1994.
  7. Pinchas Doron y Dvora Barnea, "Pressure drop and limit deposit velocity for solid-liquid flow in pipes", *Chemical Engineering Science*, Vol. 50, No. 10, pp. 1595-1604, 1995.
  8. R.B. Bird, W.E. Stewart y E.N. Lightfoot, "Fenómenos de Transporte", editorial reverté, S.A., México 2002.
  9. P. Doron, D. Granica y D. Barnea, "Slurry flow in horizontal pipes-experimental and modeling", *International Journal of multiphase flow*, Vol.13, No.4, pp535-547, 1987.
  10. A.A. Gavittnet, I.J. Sobey, "A model for the transport of cuttings in highly deviated wells", **SPE 15417**, 61<sup>st</sup> annual technical conference and exhibitions of the SPE, Nueva Orleans, 5-8 Octubre 1986.
  11. I.C. Walton, "Computer simulator of coiled tubing wellbore cleanouts in deviated wells recommends optimum pump rate and fluid viscosity", **SPE 29491**, "Productions ooperations symposium, Oklahoma, 2-4 Abril 1995.
  12. A.L. Martins, C.H.M. Sá, A.M.F. Lourenco, L.G.M. Freire y W. Campo, "Experimental determinations of interfacial frictions factor in horizontal drillings with a bed of cuttings". **SPE 36075**, Fourth SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering conference, Port of Spain, Trinidad & Tobago, 23-26 Abril, 1996.
  13. D.Nguyen y S.S. Rahman, "A three-layer hydraulic program for effective cuttings transport and hole cleaning in highly deviated and horizontal wells", **IADC/SPE 36383**, 1996 IADC/SPE Asia Pacific Drilling technology, Kuala Lumpur, Malasia, 9-11 Septiembre 1996.
  14. V.C. Kelessidis G. Mpandelis, A. Koutroulis y T. Michalakis, "Significant parameters affecting efficient cuttings transport in horizontal and deviated wellbores in coil tubing drilling: A critical review", 1<sup>st</sup> International Symposium of the Faculty of Mines (ITU) on Earth sciences and Engineering, Maslak, Istanbul, Turkia, 16-18 Mayo 2002.
  15. Ranald V. Giles, Jack B. Evett y Cheng Liu, "Mecánica de los fluidos e hidráulica", tercera edición, Mc Graw Hill, España 1994.
  16. R.K. Clark y K.L. Bickham, "A Mechanistic moder for Cuttings Transport", **SPE 28306**, SPE 69<sup>th</sup> Annual Technical Conference and Exhibition, Nueva Orleans, 25-28 Septiembre, 1994.
  17. Munson Young Okiishi, "Fundamentos de mecánica de fluidos", Limusa Wiley, México 2004.
  18. A.M. Kamp y M. Rivero, "Layer modeling for cuttings transport in highly inclined wellbores", **SPE 53942**, 1999 SPE Latin American and Caribbean Petroleum engineering conference, Caracas, Venezuela, 21-23 Abril 1999.
  19. Hyun Cho, Subhash N.Shah y Samuel O. Osisanya,"Efecto f fluy flor in a porous cutting-bed on cuttings transport efficiency and hydraulics", **SPE 71374**, presentado en la 2001 SPE Annual Technology Conference and Exhibition, New Orleans, September 30-3 Octubre 2001.
  20. R.A. Bagnols, F.R.S., "The flow of cohensionless grains in fluids", *Phil. Trans. Roy. Soc. London* (1956) A249, 235-297.

- 
21. A.L. Martins y C. Costapinto Santana, "Evaluation of cuttings transport in horizontal and near horizontal wells- a dimensionless approach", **SPE 23643**, Second Latin American Petroleum Engineering Conference, II LAPEC, Caracas, 8-11 Marzo, 1992.
  22. Willim M. Deen, "Analysis of transport phenomena", Oxford University Press, Nueva York 1998.
  23. P. Doron y D. Barnea, "Effect of the no-slip assumption on the prediction of solid-liquid flow characteristics", International Journal of multiphase flow, Vol.18, No.4, pp. 617-622, 1992.
  24. Denno G. Zill, "Ecuaciones Diferenciales con aplicaciones", segunda edición, Grupo editorial Iberoamérica, Colombia 1998.
  25. Alain A. Gavignet y Ian J. Sobey, "Model aids cuttings transport predictions", **SPE 15417-PA**, JPT, Vol.41, No.9, Pag.916-921. Septiembre, 1989.
  26. Earl W. Swokowski, "Cálculo con Geometría Analítica", Segunda Edición, Grupo editorial Iberoamérica, México 1989.
  27. Edwin J. Purcell y Dale Varberg, "Cálculo con geometría analítica", cuarta edición, Prentice Hall, México 1987.

## REFERENCIAS CAPITULO 7

1. A Mechanistic Model for Cuttings transport, R.K.Clark y K.L.Bickham, SPE 28306, SPE 69<sup>th</sup> Annual Technical Conference and Exhibition, -New Orleans, 25-28 September 1994.
2. Recommended Practice on the Rheology and Hydraulics of Oil-well Drilling Fluids, API Recommended practice 13D, Fourth edition, May 2003, American Petroleum Institute.
3. Comparing a Basic Set of Drilling Fluid Pressure-Loss Relationship to flow Loop and Field data, Mario Zamora, Sanjit Roy y Ken Slater.