

01174



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

MAESTRIA EN INGENIERIA PETROLERA  
FACULTAD DE INGENIERIA

Unidad de Administración del Posgrado

## HIDRAULICA EN AGUJEROS REDUCIDOS PARA LA TECNICA DE PERFORAR CON TUBERIA DE REVESTIMIENTO

TESIS

Para obtener el grado de:  
Maestría en Ingeniería Petrolera

Presenta

Victor Manuel Santana Anaya



Tutor: DR. FERNANDO SAMANIEGO VERDUZCO

México, D.F.

Junio del 2005

m345645



Universidad Nacional  
Autónoma de México



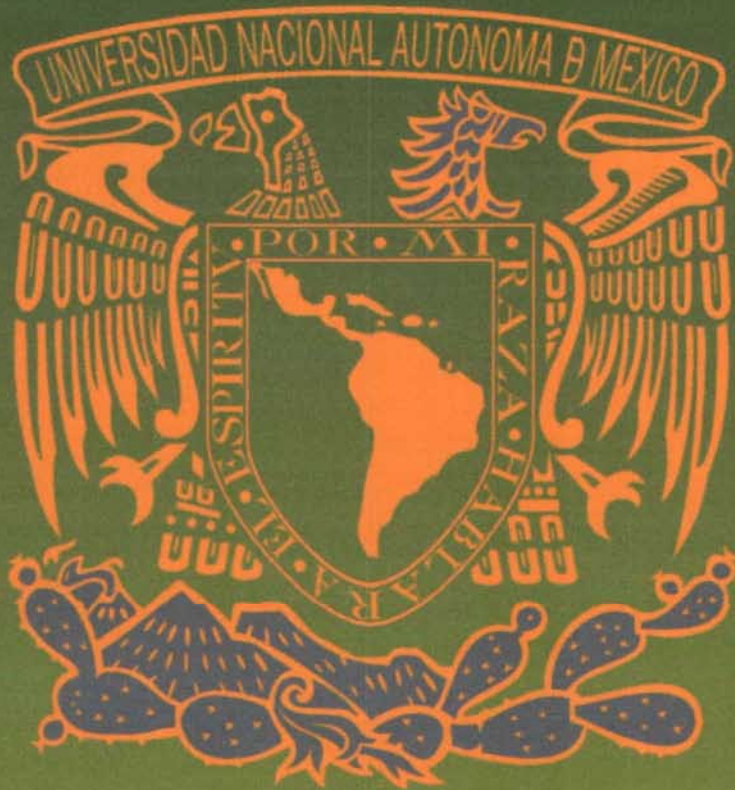
**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

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

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

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

# HIDRÁULICA EN AGUJEROS REDUCIDOS PARA LA TÉCNICA DE PERFORAR CON TUBERÍA DE REVESTIMIENTO



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

VICTOR MANUEL SANTANA ANAYA  
DR. FERNANDO SAMANIEGO VERDUZCO

## CONTENIDO

- 1.- INTRODUCCIÓN.
- 2.- ANTECEDENTES Y OBJETIVO.
  - 2.1 Antecedentes.
  - 2.2 Objetivo.
- 3.- PRUEBA DE CAMPO, DESCRIPCIÓN, CONDICIONES Y RESULTADOS.
- 4.- ANÁLISIS DEL DISEÑO CONVENCIONAL Y EL DISEÑO PROPUESTO.
  - 4.1 Análisis Técnico.
    - 4.1.1 La comparación hidráulica de un pozo de diámetro reducido a uno convencional.
  - 4.2 Análisis de Operación.
    - 4.2.1 Descripción del proceso de perforación.
      - 4.2.1.1 Selección de juntas.
      - 4.2.1.2 Circulación.
      - 4.2.1.3 Toma de registros.
      - 4.2.1.4 Cementación de revestimientos.
      - 4.2.1.5 Corte de núcleos.
- 5.- PROGRAMA HIDRÁULICO.
  - 5.1 Optimización de la hidráulica.
  - 5.2 Velocidad Anular y Limpieza del Agujero
  - 5.3 Perfil de la velocidad anular.
    - 5.3.1 Régimen de flujo.
    - 5.3.2 Reología del lodo.
    - 5.3.3 Excentricidad de la sarta de trabajo.
    - 5.3.4 Esfuerzo de corte en el pozo.
  - 5.4 Perdida de presión anular.
    - 5.4.1 Rotación de la sarta.
    - 5.4.2 Excentricidad de la tubería.
    - 5.4.3 Densidad equivalente de circulación.
  - 5.5 Remoción de recortes.
  - 5.6 Ajuste de un modelo reológico para el cálculo de la hidráulica.
  - 5.7 Cuadro comparativo de las caídas de presión por fricción.
  - 5.8 Caídas de presión por fricción calculadas en cada una de las secciones del aparato de perforación con agujero esbelto.

UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: SANTANA ANAYA  
VICTOR MANUEL

FECHA: 15 - JUNIO - 2005

FIRMA: 

6.- ANALIZAR CADA UNO DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN PARA QUE EXISTAN DIFERENCIAS ENTRE LOS VALORES REALES Y LOS CALCULADOS.

7.1 Excentricidad.

7.2 Remoción de recortes.

7.3 Efecto de couette.

7.- ANÁLISIS GRÁFICO COMPARANDO LAS CAÍDAS DE PRESIÓN POR FRICCIÓN (REALES DE LA PRUEBA DE CAMPO CONTRA CALCULADAS POR EL MODELO REOLOGICO) ESPECIFICAMENTE EN EL AGUJERO REDUCIDO.

8.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

REFERENCIAS.

ANEXO "A"

## RESUMEN

En este trabajo se propone la Técnica de Perforar con Tubería de Revestimiento, como una revolucionaria idea para la reducción de los Costos en la Perforación de Pozos Petroleros. Se aplicó esta técnica en el Campo de Gas Arcabuz-Culebra, por ser uno de los que tiene actualmente la mayor actividad y un ambicioso Plan de Desarrollo para los próximos cinco años.

Con esta técnica la Tubería de Revestimiento de 5 ½" HD-521, se utiliza como Tubería de Perforación, para perforar la primera etapa con barrena tricónica de 12 ¼" y la segunda etapa con barrena PDC de 8 ½". En la primera etapa se corre la T.R. de 9 5/8" y es cementada. En la segunda etapa se perfora con la misma T.R. de 5 ½" hasta la profundidad programada y finalmente se introduce con Zapata y Cople flotador para ser cementada como Tubería de Revestimiento Intermedia.

En ambas etapas se deberá sacar la T.R. de 5 ½" HD-521 a superficie en lingadas para eliminar barrena y herramientas de perforación en cada caso.

La tercera etapa se perfora con Tubería de Producción de 2 7/8" HD-533, barrena PDC de 4 ¾" y motor de fondo de 3 ½". Una vez alcanzada la profundidad deseada se recupera la T.P. de 2 7/8" a superficie en lingadas para eliminar barrena y herramientas de perforación. Finalmente se introduce con Zapata y Cople flotador para ser cementada como T.R. de Explotación y asimismo realizar la función de Aparejo de Producción (Técnica Tubingless), la cima de cemento deberá tener un traslape mínimo de 100 a 200 metros con respecto a la T.R. anterior.

En la Planeación de la perforación de Campos de Desarrollo se deberá implementar como una práctica común la "Reingeniería de Diseño de Pozos", en todos los procesos establecidos para la perforación de pozos de petróleo y gas. Esto permitirá reducir constantemente los costos de la perforación y aumentar la rentabilidad de los proyectos de inversión (Activos) en Campos con explotación intermedia o avanzada, al incorporar nuevas tecnologías que permitan a la empresa lograr dichos objetivos.

**Como un presente a mi querida esposa  
Maria Elsa Puga Meraz por su apoyo  
en la elaboración de este trabajo.**

**Con todo mi cariño a mis hijos  
Elsa Mariela y Víctor Manuel.**

**Mi especial agradecimiento a los ingenieros  
Martín Terrazas Romero  
Daniel García Gavito  
Vicente Casariego Gonzáles  
Fernando Samaniego Verduzco  
Nicolás Rodríguez Salcedo  
Joaquín Mendiola Sánchez  
Por su ayuda en la realización  
de la maestría.**

# CAPITULO 1

## 1.- INTRODUCCIÓN

La Maestría en Ingeniería de perforación, esta preocupada por mantener su nivel académico, por lo que tiene entre sus principales objetivos el estar a la vanguardia en la Tecnología de perforación y así ser competitivos con las instituciones nacionales e internacionales, en el entendimiento de que toda incorporación de tecnología deberá de ser encaminada a una reducción en los costos y/o en un incremento en los beneficios que se generen a nuestra empresa. En este entorno se detectó la técnica del “Casing Drill”.

Cuyo objetivo es el de conocer la técnica de perforación con tubería de revestimiento, asimilar lo más posible esta tecnología de tal forma que podamos transmitirla y moldear un criterio de aplicación en los campos petroleros de México.

El cambio básico consiste en eliminar la sarta de perforación y sustituirla por la tubería de revestimiento. De acuerdo a la perspectiva de las compañías que han incursionado en este método de perforación, se podrá lograr un ahorro en el costo hasta de un 30% o 35% en el tiempo total de perforación.

Este tipo de perforación ha sido encabezada por la compañía Tesco Inc., la cuál en la actualidad, tiene pendiente una serie de estudios para perfeccionar la técnica, destacando una serie de áreas de oportunidad como son: Hidráulica en agujeros reducidos, diseño de sartas tanto de perforación como de tubería de revestimiento y diseño de aparejos de producción.

En este contexto, se incorpora el estudio motivo de está tesis, como es la hidráulica para agujeros reducidos durante la perforación con tubería de revestimiento.

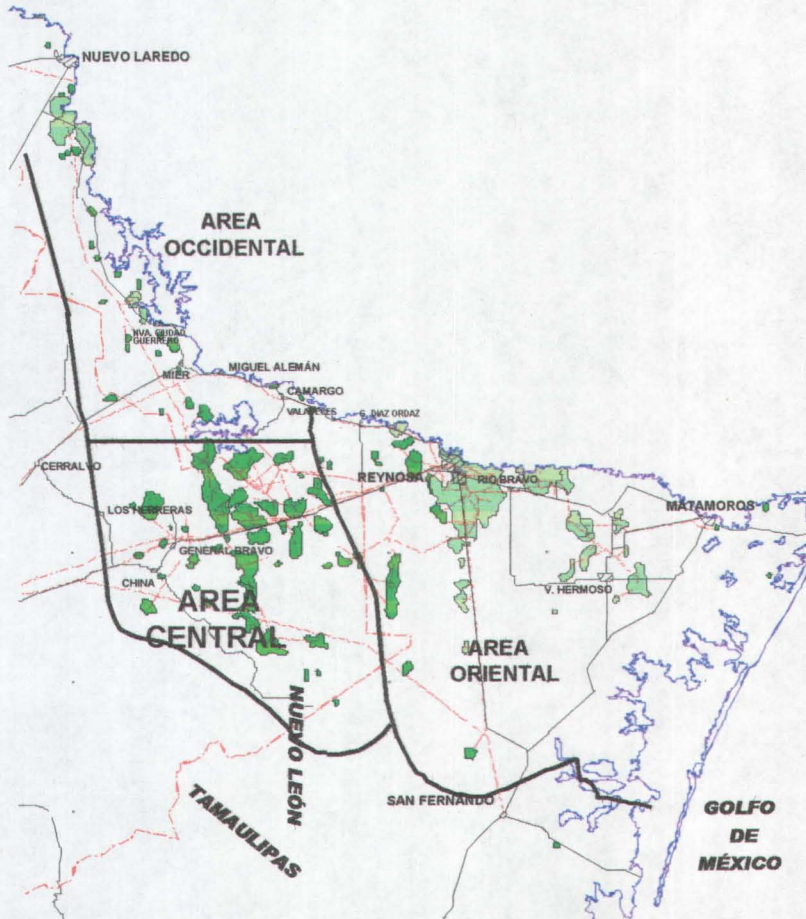


## CAPITULO 2

### 2.- ANTECEDENTES Y OBJETIVO

#### 2.1 ANTECEDENTES

La Cuenca de Burgos corresponde al Distrito Reynosa en la zona noreste de la República Mexicana (Figura 2.1). Se caracteriza por ser un yacimiento productor de gas. Entre los campos que componen la Cuenca de Burgos se encuentra el campo Arcabuz - Culebra, que tiene una producción promedio diaria de 1,022 MMPCD, donde la producción por pozo varía de 4 a 8 MMPCD.



(Figura 2.1)

El campo **ARCABUZ-CULEBRA** se perfora en formaciones compuestas de lutitas y arenas del terciario, el objetivo es continuar con el desarrollo y explotación de la arena (w-4) productora del campo, las arenas productoras en estos campos se encuentran a las profundidades promedio de:

<b>FORMACIÓN</b>	<b>PROFUNDIDAD (m)</b>
E. YEGUA	AFLORA
E. COOK MOUNTAIN	300.0
E. WECHES	800.0
E. Q. CITY	900.0
E. REKLAW	1450.0
E. WILCOX	1850.0
ARENA W-1	2100.0
ARENA W-2	2200.0
ARENA W-3	2370.0
ARENA W-4	2470.0

La perforación de estos pozos tiene una duración aproximada de 24 días para un pozo vertical y 27 días para un pozo direccional, el tiempo de perforación se ha ido optimizando con el desarrollo del campo.

Y los costos actualmente son de \$ 1,900,000 USD para pozos verticales y \$ 2,000,000 USD para pozos direccionales.

**LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO REQUERIDAS PARA PERFORAR ESTOS POZOS SON:**

<b>ETAPA</b>	<b>PROFUNDIDAD (m)</b>	<b>LODO</b>	<b>DENSIDAD (gr/cc)</b>
1	150	base agua	1.15 – 1.20
2	1500	base aceite	1.43 – 1.45
3	2900	base aceite	1.82 – 1.85

**LOS DATOS DEL YACIMIENTO SON:**

Presión del yacimiento (W-4) 310 Kg/cm<sup>2</sup>

Temperatura del yacimiento 136 °C

Gasto pronosticado 6.0 mmpcd

El programa para los próximos cinco años se ha establecido para una mejor planeación del campo, así como una programación que nos permita de manera eficiente optimizar la explotación del mismo (tabla 2.1).

## PLAN DE DESARROLLO

1999 - 2003

(TABLA 2.1)

### PERFORACION 1999 - 2003

LOCALIZACIONES WILCOX		LOCALIZACIONES MS	
ANO	NÚM. DE POZOS	ANO	NÚM. DE POZOS
1999	(58)	1999	(02)
2000	(55)	2000	(16)
2001	(56)	2001	(16)
2002	(45)	2002	(34)
2003	(24)	2003	(31)
<b>SUBTOTAL</b>	<b>(238)</b>	<b>SUBTOTAL</b>	<b>(99)</b>
<b>GRAN TOTAL</b>		<b>238 + 99 = 337</b>	

## **2.2 OBJETIVO**

DETERMINAR LAS DIFERENCIAS EN EL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO PARA AGUJEROS REDUCIDOS EN PERFORACIÓN CONVENCIONAL CONTRA LA TÉCNICA DE PERFORACIÓN CON TUBERÍA DE REVESTIMIENTO.

## **APORTACIÓN ACADEMICA Y OPERATIVA**

### **1.- ACADEMICA**

AJUSTE DE UN MODELO REOLOGICO A LOS FLUIDOS UTILIZADOS EN LA PRUEBA DE CAMPO.

### **2.- ACADEMICA**

ELABORACIÓN DE UN PROGRAMA QUE PERMITE CALCULAR LAS CAÍDAS DE PRESIÓN POR FRICCIÓN, TANTO EN EL INTERIOR DE LA SARTA DE PERFORACIÓN COMO EN EL ESPACIO ANULAR

### **3.- ACADEMICA**

ANÁLISIS GRÁFICO COMPARANDO LAS CAÍDAS DE PRESIÓN POR FRICCIÓN (REALES DE LA PRUEBA DE CAMPO CONTRA CALCULADAS POR EL MODELO REOLOGICO) ESPECIFICAMENTE EN EL AGUJERO REDUCIDO.

### **4.- ACADEMICA**

ANALIZAR UNO A UNO LOS FACTORES QUE INTERVIENEN PARA QUE EXISTAN DIFERENCIAS, ENTRE LOS VALORES REALES Y LOS CALCULADOS.

### **5.- OPERATIVA**

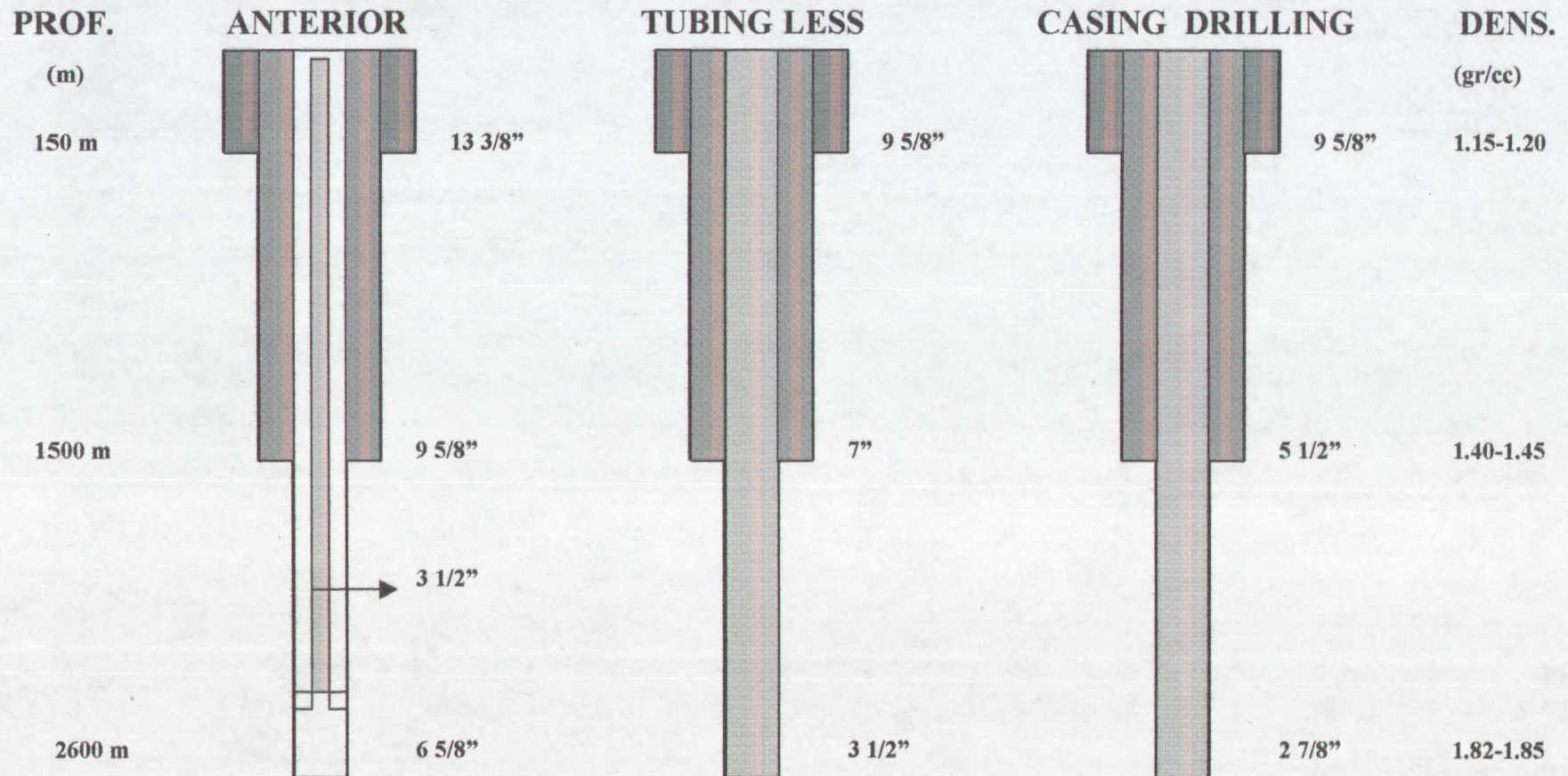
ES FACTIBLE PERFORAR CON TUBERÍA DE REVESTIMIENTO.

### **6.- OPERATIVA**

UNA REDUCCIÓN IMPORTANTE EN EL COSTO SE OBTIENE AL DEJAR DE UTILIZAR TUBERÍA DE PERFORACIÓN.

## EVOLUCIÓN DEL DISEÑO DE LA GEOMETRÍA DE POZOS CAMPO ARCABUZ – CULEBRA

Anteriormente se perforaban los pozos en 3 etapas la primera a 150 m y se cementaba TR de 13 3/8", La segunda a 1500 m para TR de 9 5/8" y la tercera a 2600 m para TR de 6 5/8". Después de 1995 se terminan los pozos tipo Tubingless cementando tuberías de revestimiento de 9 5/8" en la primera etapa, 7" en la segunda y 3 1/2" en la tercera.



## CAPITULO 3

### 3.- PRUEBA DE CAMPO, DESCRIPCIÓN, CONDICIONES Y RESULTADOS.

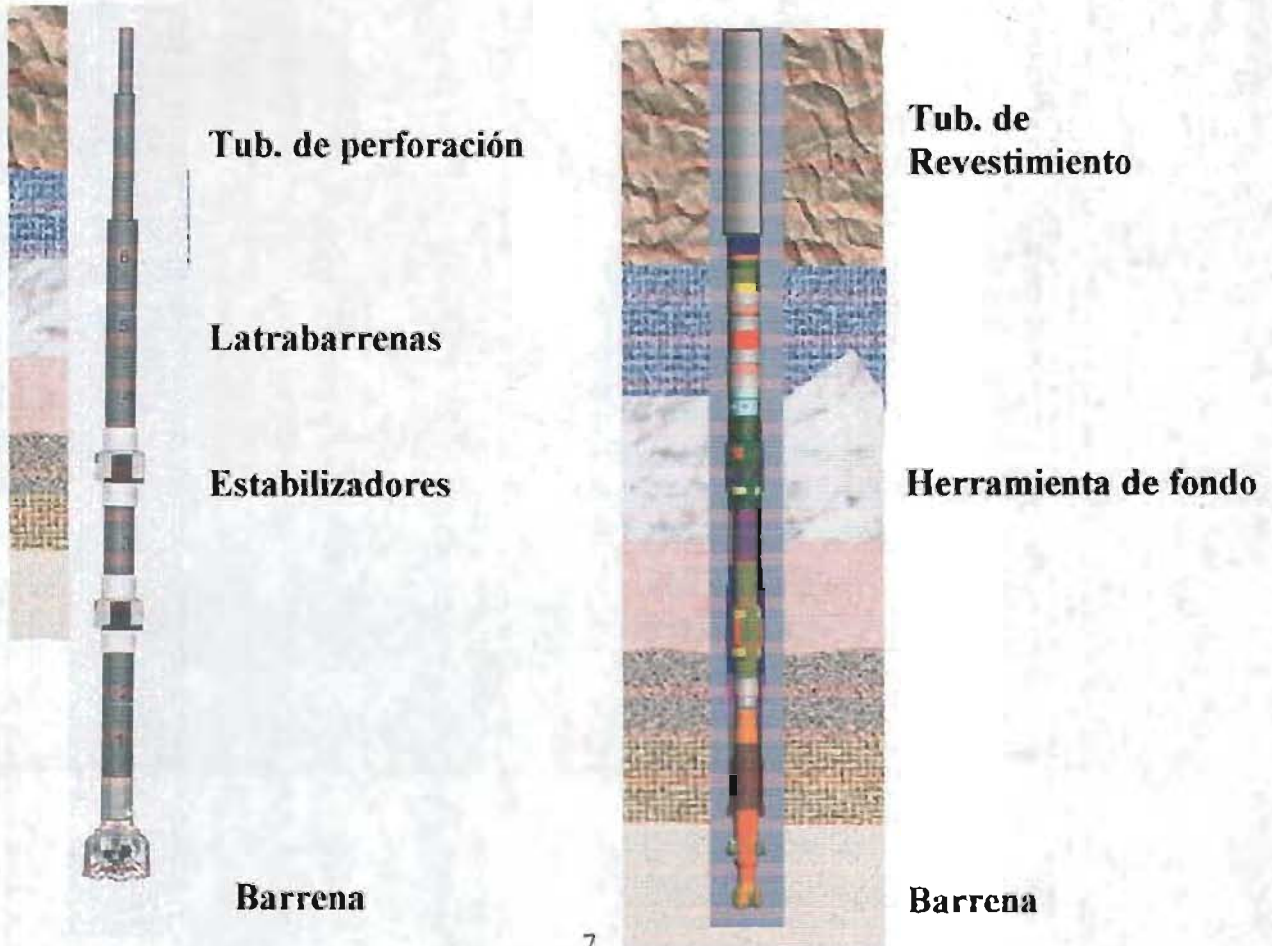
#### ¿QUÉ ES CASING DRILLING?

Es la técnica de perforar con tubería de revestimiento. El cambio básico consiste en eliminar la sarta de perforación y sustituirla por la tubería de revestimiento.

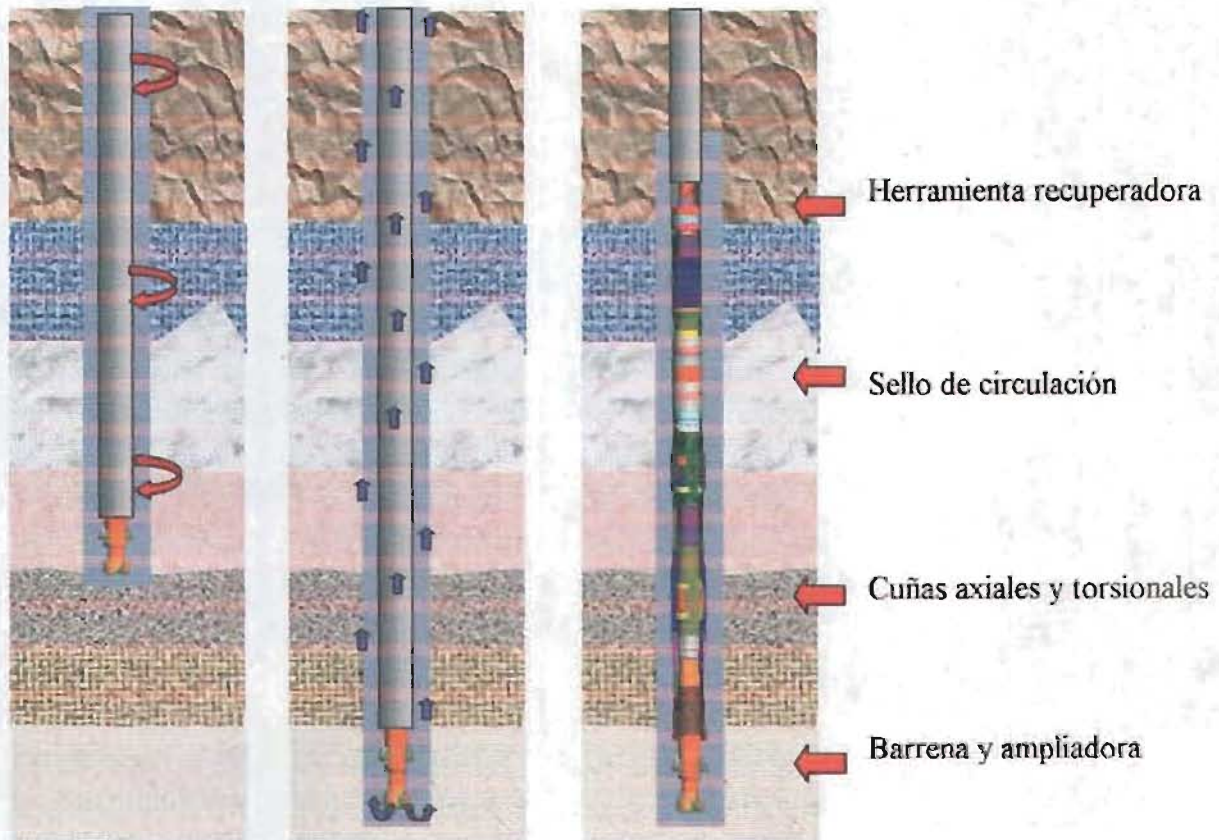
#### CAMBIOS SUSTANCIALES

- Eliminación de TP y Drill Collars.
- Optimiza los viajes para cambio de barrena.
- Incremento de la seguridad en la perforación.
- Reducción de los costos de equipo.
- Reducción en el costo del pozo.

**FIGURA 3.1 DIFERENCIAS EXISTENTES ENTRE UNA SARTA CONVENCIONAL Y LA SARTA CON LA NUEVA TÉCNICA CASING DRILLING.**



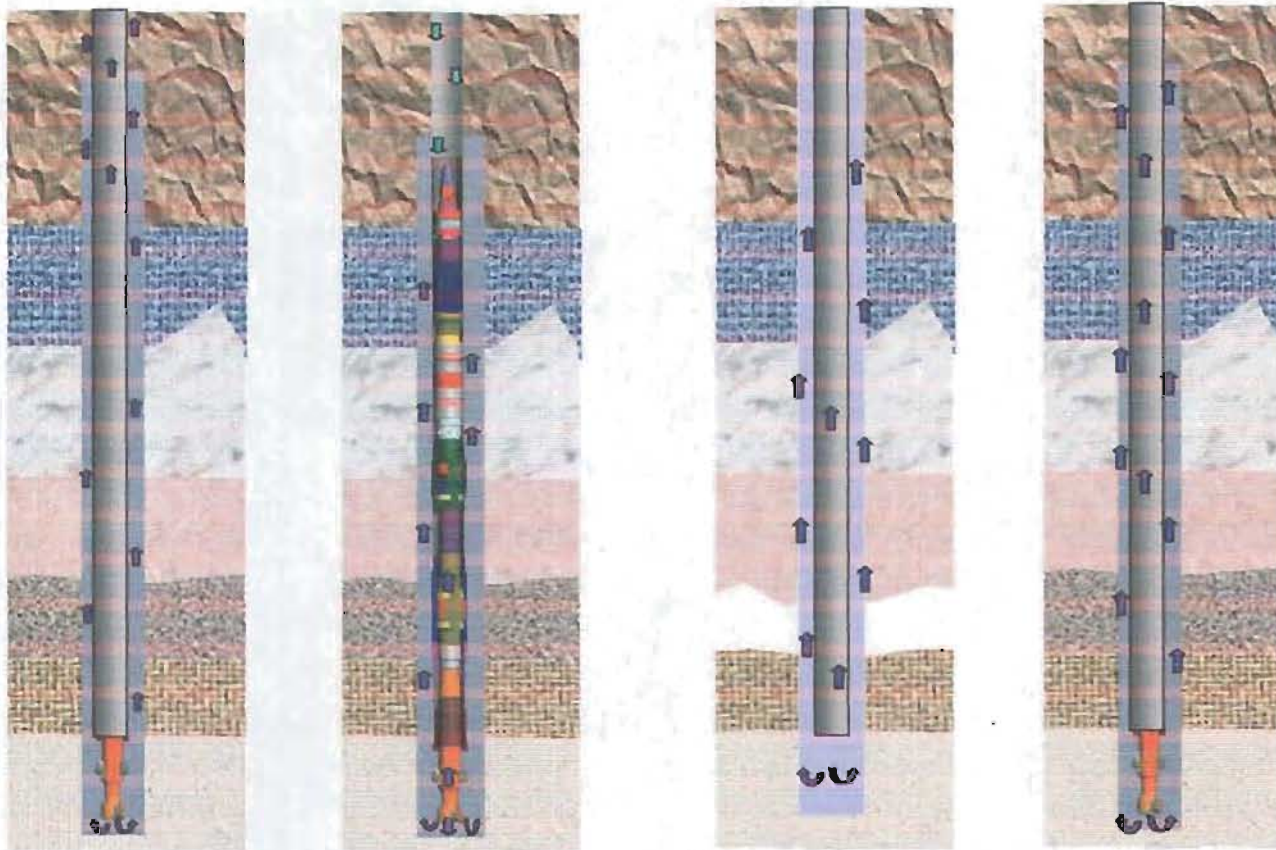
**FIGURA 3.2 SECUENCIA OPERATIVA DURANTE LAS OPERACIONES DE PERFORACIÓN Y TIEMPO DE CIRCULACIÓN.**



Durante las operaciones de perforación, el ensamble se mete o saca a través de la tubería de revestimiento, cuantas veces sea necesario, sin la necesidad de sacar la tubería de revestimiento, esto optimiza el tiempo que se pierde en sacar y meter toda la tubería en el pozo, el ensamble se introduce o saca con el auxilio de línea de acero.

En las figuras anteriores se puede ver como sale el ensamble de fondo para continuar perforando, permitiendo durante esta operación la circulación del fluido de perforación, evitando así posibles pegaduras o asentamiento de recortes al interrumpir la circulación.

Durante un cambio de barrena, el ensamble se saca y mete sin interrumpir la circulación del lodo de perforación, dando lubricidad y evitando que se atore el ensamble, durante las operaciones que permiten el cambio de la barrena de perforación.



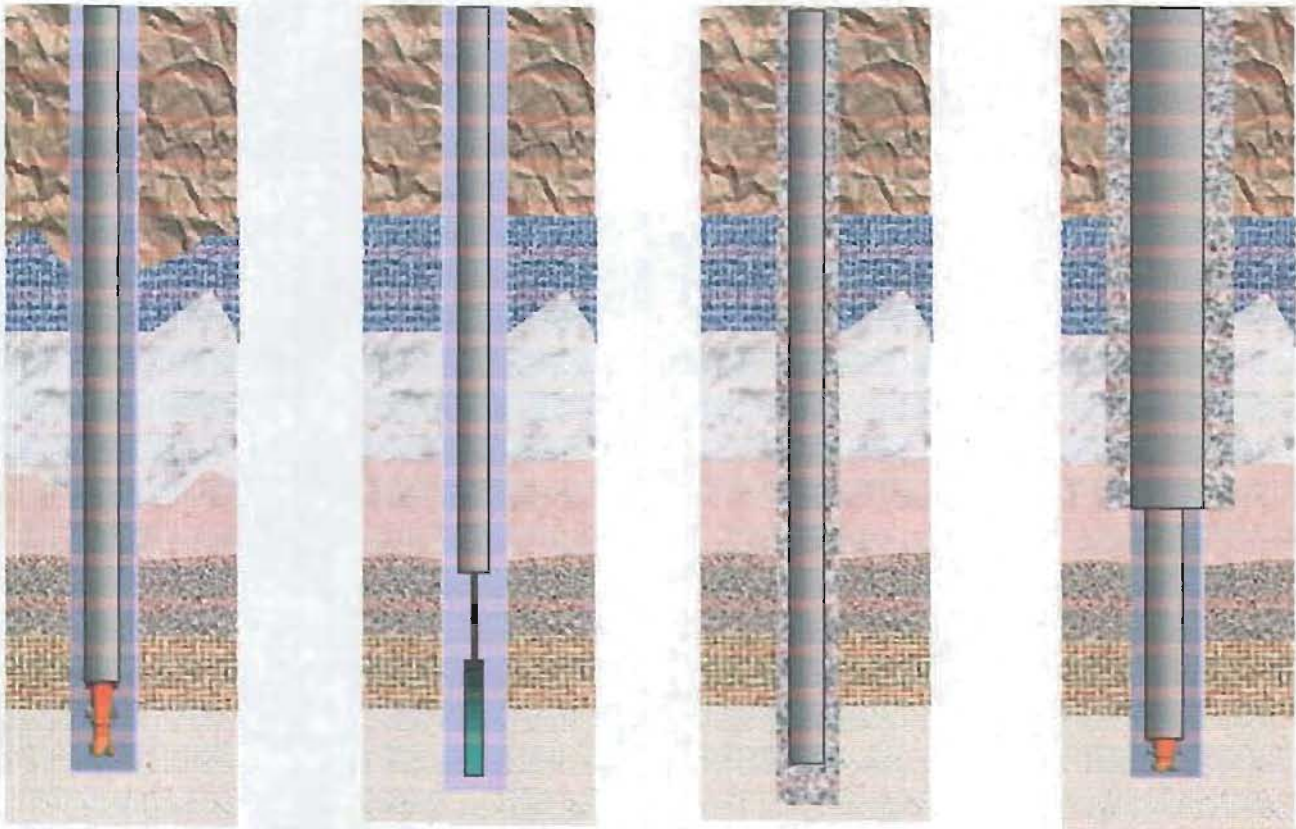
**FIGURA 3.3**

Finalmente mostramos otras actividades complementarias que se realizan con este nuevo equipo durante la perforación del pozo y estas son; registrando y cementando.



## Registrando

## Cementando

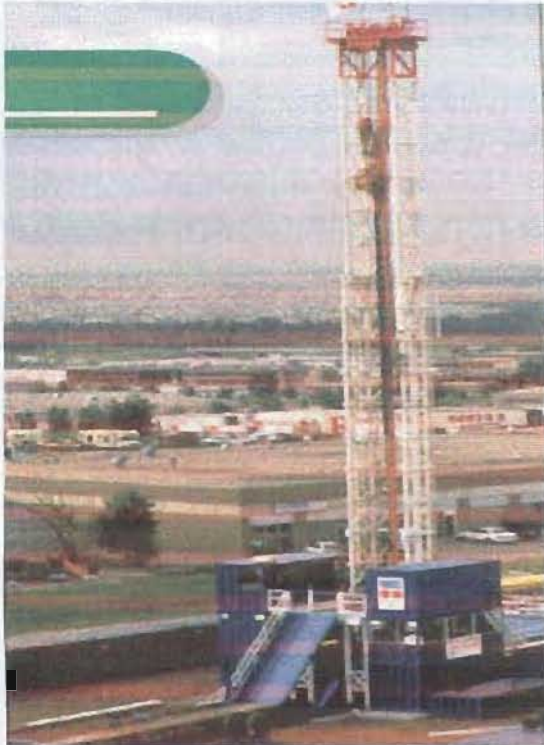


**FIGURA 3.4**

Hasta aquí hemos destacado los cambios más sustanciales en el aparejo de perforación, tanto en el diseño del equipo como en el modo de operarse, como ya lo hemos visto existen cambios muy significativos, entre las técnicas convencionales y ésta técnica.

Por otra parte mostraremos algunos de los cambios en el diseño del equipo de perforación y el motivo por el cual se realizó dicho cambio, buscando ante todo la optimización de las actividades de perforación.

**DIFERENCIAS ENTRE EL EQUIPO CONVENCIONAL Y EQUIPO PARA PERFORAR CON TUBERIA DE REVESTIMIENTO.**



**Figura 3.5** Los mástiles de los equipos son más pequeños que los utilizados en los equipos



**Figura 3.6** El juego de poleas en la corona tiene un diseño especial, con la finalidad de poder manejar el cable con que se recupera la herramienta de fondo.



**Figura 3.7** El block viajero tiene diseño especial, se compone de dos juegos de poleas lo cual permite el paso del cable de acero por en medio de las dos.



**Figura 3.8** Es necesario la utilización del Top-Drive para rotar la tubería.

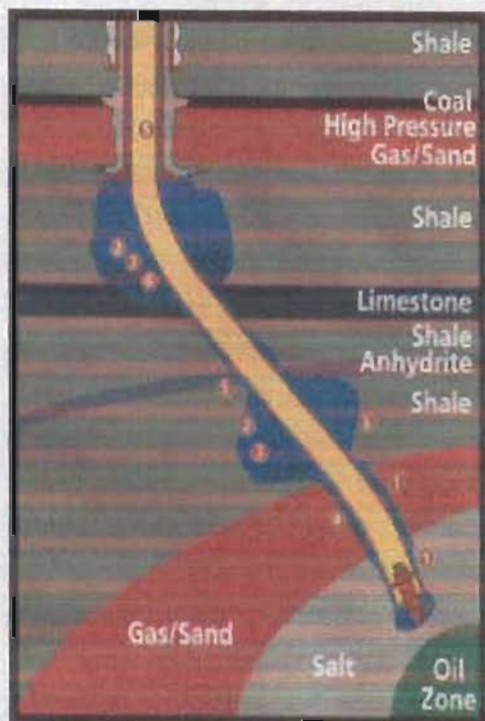
El Top-Drive es diferente al convencional, ya que tiene integrado un conjunto de preventores para el cable de 5/8".



**Figura 3.9** El equipo cuenta con dos malacates, una para el manejo del cable de perforación y el otro para el manejo del cable de 5/8”.



### Casing Drilling



### **Figura 3.10** CONSIDERACIONES:

La barrena y herramientas de fondo son recuperadas a través de la tubería de revestimiento.

Se mantiene circulación durante todo el proceso de perforación.

Se evita la presencia de las presiones de suabeo y surgencia.

Las conexiones de la tubería de revestimiento deben ser diseñadas para soportar las condiciones de perforación.

Se reducen las pérdidas de circulación y los esfuerzos de torsión.

De acuerdo a la última reunión, esta técnica se utiliza en formaciones de suaves a medias, actualmente se utilizan dos procedimientos para perforar. El primero de ellos y el más difundido es el de barrena ampliadora retraíble y pescada a través de la tubería con cable para ser cambiada; éste método es promovido por la compañía Tesco.

El segundo de ellos es una barrena prediseñada sobre un núcleo de aluminio y con aletas deformables, esto significa que la etapa se debe perforar con una sola barrena, al término se lanza una bola que asienta en el núcleo de aluminio volviéndose ciego, empujando hacia delante y deformando los brazos de la barrena, actuando ésta parte como zapata.

Como conexión se está utilizando una rosca buttres modificada con un anillo en cuadro para aumentar la resistencia al torque se llama DWC/C en pruebas de campo trabajó de 100-150 rpm, 10,000 lbs de peso s/bna, torque 2000-3000 ft-lb.

Con todos estos antecedentes, se planeo la perforación del primer pozo mexicano, utilizando recursos propios para evitar erogaciones adicionales, dando como resultado la adecuación de un equipo de perforación convencional, donde se tuvieron que realizar algunas adecuaciones, que nos permitieran perforar con la técnica del Casing Drilling.

Con las adecuaciones del equipo convencional, y ante la falta de un ensamble de perforación adecuado a ésta técnica, surge la necesidad de implementar un aparejo de perforación híbrido, que nos permitiera observar el comportamiento de la tubería de revestimiento y la conexión seleccionada, como aparejo de perforación.

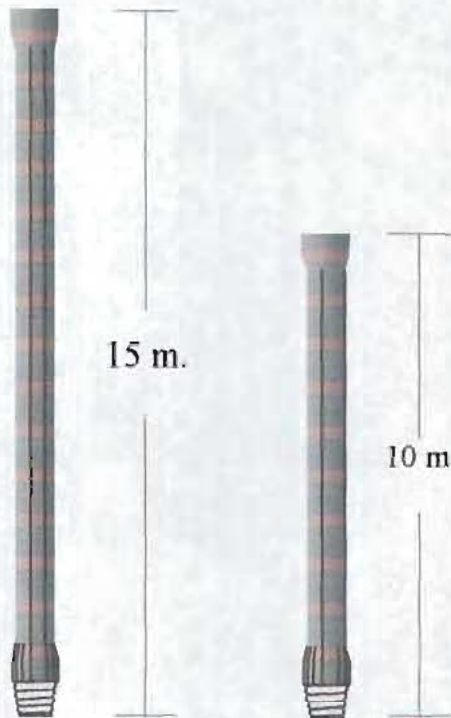
Dando como resultado la perforación del pozo Culebra No. 281 en la Cuenca de Burgos. A continuación se detalla tanto las modificaciones del equipo como la técnica empleada en su exitosa perforación.



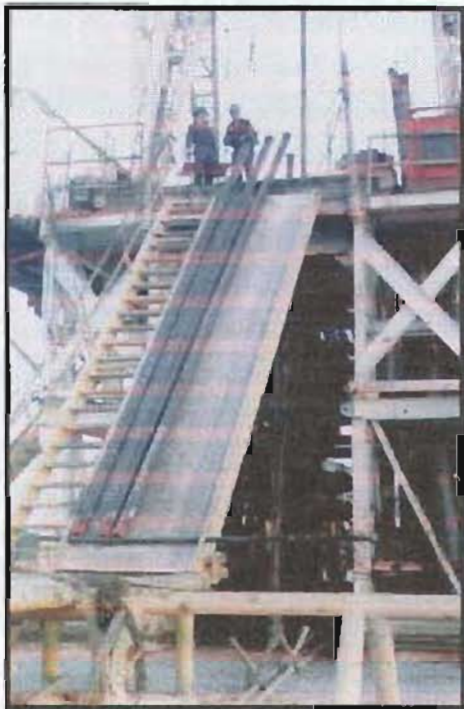
**Figura 3.11 CONSIDERACIONES:**

- ✓ El equipo es convencional.
- ✓ Sustituir por flecha de 15 metros.
- ✓ Considerar la longitud de la rampa
- ✓ Abrir los peines de la changuera
- ✓ Implementar indicador de torsión

## MODIFICACIONES REALIZADAS A UN EQUIPO CONVENCIONAL DE PERFORACIÓN PARA UTILIZARSE CON LA TÉCNICA DEL CASING DRILLING.

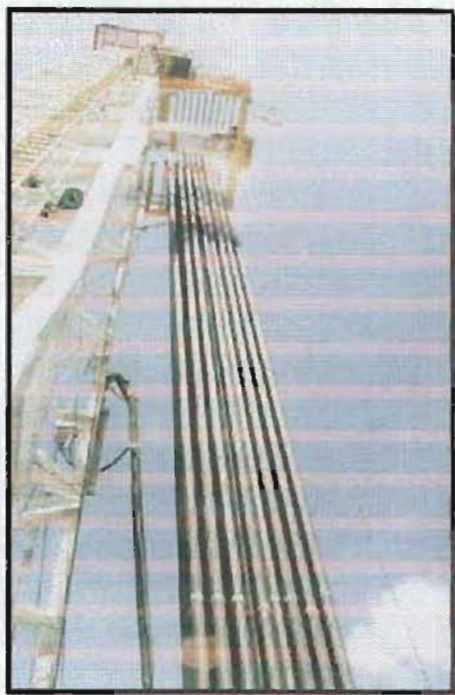


**Figura 3.12** Deberá sustituirse la flecha (Kelly) por una de 15 m de longitud, para lo cual se necesitará modificar la profundidad del agujero auxiliar y aumentar la longitud del “Stand Pipe y la manguera del cuello de ganso”.

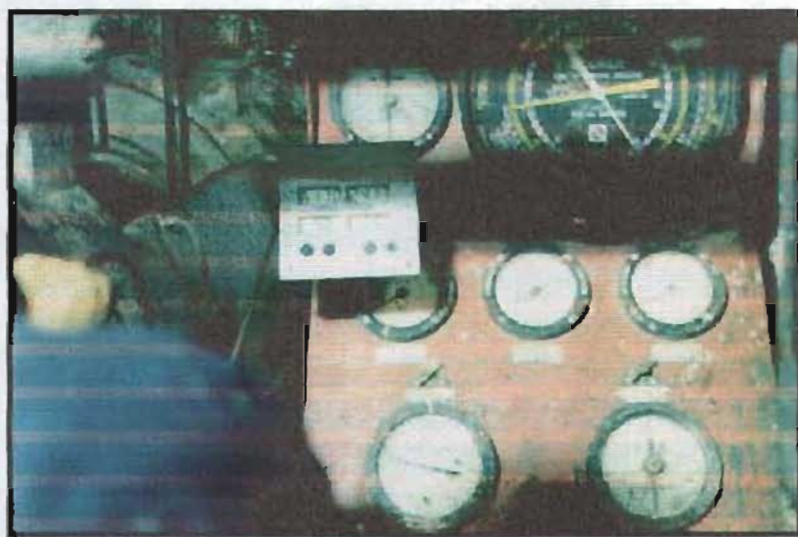


**Figura 3.13** La rampa deberá considerar la nueva longitud de la tubería.

Para poder minimizar el tiempo en la maniobra de izaje del tubo y así poder optimizar la conexión.



**Figura 3.14** Los peines de la changuera deberán abrirse entre 4 y 6 centímetros más que el diámetro exterior de la tubería de revestimiento a utilizar



**Figura 3.15** Se recomienda la implementación de un indicador de torsión como una herramienta necesaria durante la perforación del pozo.

## HERRAMIENTAS Y ACCESORIOS PARA PERFORAR CON TUBERÍA DE REVESTIMIENTO.



**Figura 3.17**

- ✓ Barrena PDC de 8 ½"
- ✓ Estabilizadores de 6 ½" x 8 3/8"
- ✓ Lastrabarrena helicoidal de 6 ½"
- ✓ TR de 5 ½" 17 lb/pie N-80
- ✓ Guia de enchufe



**Figura 3.17** Se perforó con barrena PDC de 8 ½", la cuál se tiene bien identificada para los tipos de formación que componen el Campo Arcabuz-Culebra. En este campo se tiene muy buen avance en esta etapa (arriba de 400 m/día).

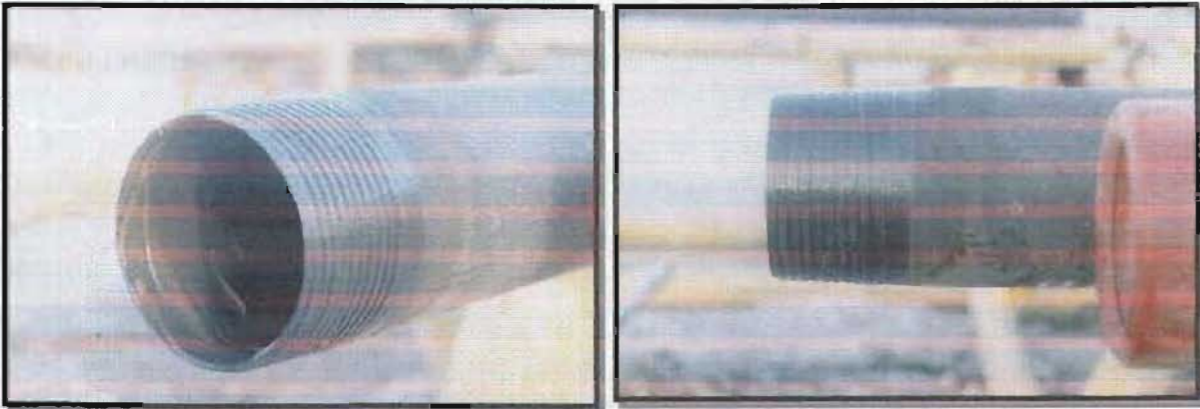




**Figura 3.18** Los estabilizadores son de aletas soldables y se realizaron con un 1/8" menos para disminuir sustancialmente la resistencia al torque y arrastre



**Figura 3.19** Para evitar cualquier posibilidad de pegadura por presión diferencial, se implementaron el uso de lastrabarreras helicoidales y reologias bajas en el lodo de perforación.



**Figura 3.20** Se verificó que la tubería de revestimiento y las juntas utilizadas en la perforación del pozo Culebra No. 281, tuvieran valores de torsión y arrastre iguales o mayores que los de la tubería de perforación.



**Figura 3.21** Buscando reducir el tiempo en la conexión, se implementaron algunos accesorios, en los que destaca el uso de la guía de enchufe.

## CONDICIONES DE OPERACIÓN



**Figura 3.22 Etapa Intermedia:**

- ✓ Peso sobre barrena 4 - 6 ton.
- ✓ Revoluciones por minuto 150-180 RPM.
- ✓ Velocidad de penetración 1 - 2 min/m.
- ✓ HP en la barrena 56%
- ✓ Presión de Bombeo 1,000 - 1,500 psi
- ✓ Máxima torsión 12,000 lbs-pie.
- ✓ Densidad 1.20 - 1.35 gr/cc
- ✓ Viscosidad Plástica 10 - 20 cp
- ✓ Punto de Cedencia 6 -10 lb/100 pies<sup>2</sup>



**Figura 3.23 Tercera Etapa:**

- ✓ Peso sobre barrena 0.5 - 1 ton.
- ✓ Revoluciones por minuto 60 R.P.M.
- ✓ Velocidad de penetración 6-10 min/m.
- ✓ HP en la barrena 40%
- ✓ Presión de Bombeo 3,000 - 3,200 psi
- ✓ Máxima torsión 4,000 lbs-pie.
- ✓ Densidad 1.55 - 1.75 gr/cc
- ✓ Viscosidad Plástica 15 - 28 cp
- ✓ Punto de Cedencia 8 - 15 lb/100 pies<sup>2</sup>

## CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN



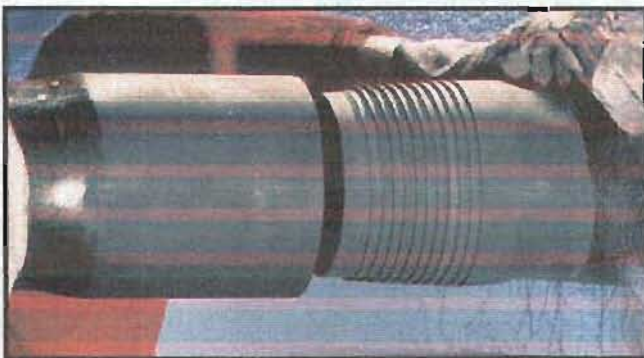
**Figura 3.24 Características:**

- ✓ Incremento en la densidad equivalente de circulación
- ✓ Mayor riesgo de pérdida de circulación.
- ✓ Manejo adecuado de la velocidad anular y valores reológicos.

## TUBERÍA

**Figura 3.25**

**T.R. de 5 ½" 17 lb/pie, N-80, HD-521.**  
 Diámetro Interior 4.892"  
 Drift API del tubo 4.767"  
 Diámetro exterior de la caja 5.761"  
 Resistencia a la tensión de la conexión 345,000 lbs  
 Resistencia a la torsión de la conexión 24,000 lb-pie  
 Par de apriete óptimo de la conexión 6,000 lbs-pie



**Figura 3.26**

**T.P. 2 7/8" 6.5 lbs./pie P-110 HD-533.**  
 Diámetro Interior 2.441"  
 Drift API del tubo 2.347"  
 Diámetro exterior de la caja 3.192"  
 Resistencia a la tensión de la conexión 199,000 lbs  
 Resistencia a la torsión de la conexión 9,100 lb-pie  
 Par de apriete óptimo de la conexión 2,200 lbs-pie

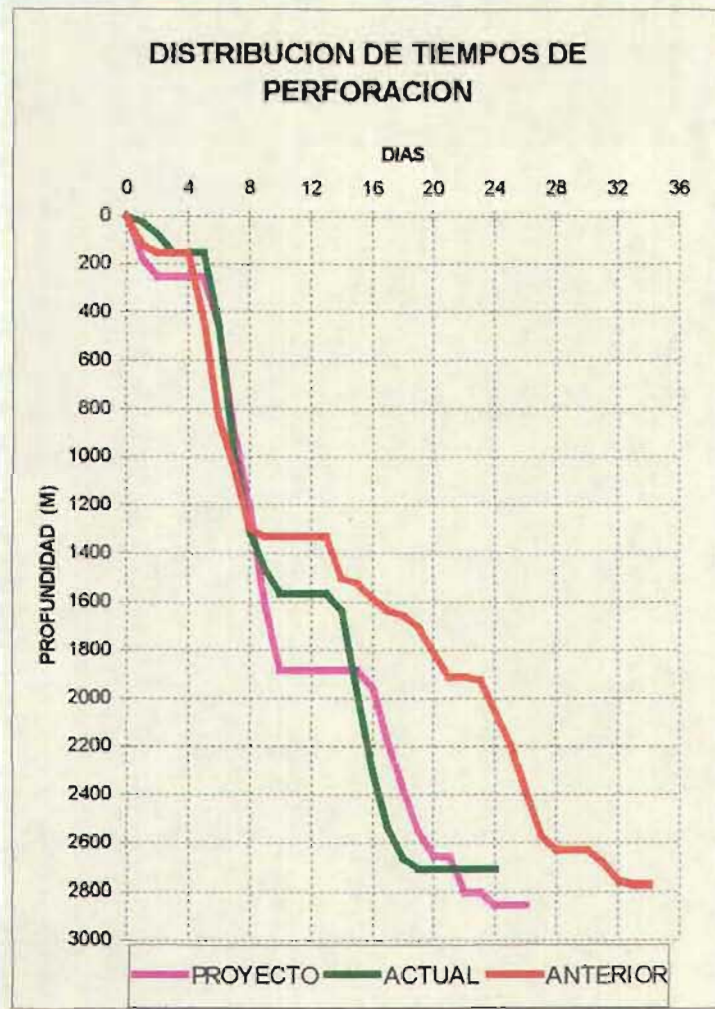


Figura 3.26

Concepto	Costo Programado	Costo Real
Profundidad (m)	2700 m	2850 m
Tiempo (dias)	24 dias	26 dias
Costo de Perforación	8,261.14	10,750.32
Costo de Terminación	4,867.90	3,398.11
Costo Total	1,900,000.00	2,000,000.00

Tabla 3.1

## RESUMEN DE OPERACIÓN

DÍA	OPERACIÓN	AVANCE	PROF.
1	Perfora normal a 175 m	175	175
2	Continua perforando normal a 250 m tomo registros doble inducción c/rayos gamma y sonico de porosidad mete TR 9 5/8" J-35 36 lb/pie a 250 m	75	250
3	Cemento TR 9 5/8", c/soldador elimina tubo conductor de 13 3/8" e instala cabezal		
4	Instala y prueba CSC 100 %		
5	Preparativos para perforar con TR de 5 1/2", afino cima de cemento y probó c/70 kg/cm <sup>2</sup> 30 min OK rebajó accesorios y cemento a 229 m		
6	Perforó a 455 m (lento por falta de bomba)	205	455
7	Perforó a 891 m	436	891
8	Perforó a 1205 m	314	1205
9	Perforó a 1618 m	413	1618
10	Perforó a 1883 m dec=1.36 gr/cc circulo densificando de 1.36 a 1.38 gr/cc y saca barrena a 1830 m	265	1883
11	Efectuó viaje corto a 1400 m y mete libre a fondo 1883 m circulo acondicionando lodo a 1.39 gr/cc p/registros. Tomó registros DIL-GR doble inducción c/rayos gamma BHC sonico de porosidad, CNL neutron compensado y LDL litodensidad		
12	Mete TR 5 1/2" N-80 17 lb/pie HD-521 a 1880 m rompiendo circulación cada 500 m		
13	Efectúa cementación, verifica llegada de tapón con 1200 psi observó circulación normal, efectúa corte, instala brida doble sello y casing-spool probó con 4500 psi, 30 min OK		
14	Instaló string de preventores, con Cía. Matiep y llave faster, apretó tornillería de los mismos, cambio rams de 5 1/2" por 2 7/8", instaló líneas hidráulicas de 1" a preventores, metió mandril y probó preventores con 6000 psi, desconecto Kelly de 5 1/4" y arma Kelly de 3 1/2", cambia roles del bushing, cambió tubo lavador y probó líneas de stand-pipe con 3500 psi 30 min OK		
15	Instaló y probó CSC 100%, instala campana, línea de flote y charola recolectora, instala media changuera, arma barrena prueba motor de fondo y continua armando herramienta y baja a 642.69 m		

DÍA	OPERACIÓN	AVANCE	PROF.
16	Continua armando TP 2 7/8" a 1851 m donde toco resistencia probó TR 5 1/2" con 105 kg/cm <sup>2</sup> 30 min OK rebaja accesorios y cemento de 1851 a 1883 m perforó a 1958 m	75	1958
17	perfora de 1958 a 2172 m	214	2172
18	perfora de 2172 a 2378 m	206	2378
19	perfora de 2378 a 2551 m	173	2551
20	perfora de 2551 a 2654 m (12-24-35)	103	2654
21	perfora de 2654 a 2656 suspende por incremento en tiempo de penetración y no tener avance (incremento de presión de 2800 a 3200-3400 psi), saco a superficie para revisar barrena y M.F., cambio M.F. y destapa barrena, mete a fondo para continuar perforando	2	2656
22	perfora de 2656 a 2800 m y circula tiempo de atraso con 70 epm PB=189 kg/cm <sup>2</sup> , densidad de entrada 1.70 x 55 y densidad de salida 1.70x60	144	2800
23	efectuó viaje corto a 2300 m y circuló densificando lodo de 1.70 a 1.72x65, saco barrena y motor de fondo a superficie tomó registros Cia Slumberger, doble inducción con rayos gamma de 2800 a 1880 m, suspende registros por cambio de programa (profundizar a 2850 m)		
24	mete barrena y motor de fondo a fondo y perforó a 2850 m circuló y efectuó viaje corto a 2500 m y mete libre a fondo, saca barrena y motor de fondo a 670 m (llenando c/3 ling)	50	2850
25	sacó barrena y motor de fondo a superficie, se tomaron registros Inducción 2850-1880 m, Sonico 2850-1880 m Densidad 2850-1880 m, Neutron 2850-1880 m Rayos gamma 2850-1880 m, Giroscópico 2850-1880 m		
26	Conecto zapata y cople flotador 2 7/8" M-Vam P-110 64 lb/pie TP 2 7/8" M-Vam P-110 6.4 lb/pie mete a fondo.		

## CAPITULO 4

### 4.- ANÁLISIS DEL DISEÑO CONVENCIONAL Y EL DISEÑO PROPUESTO.

#### 4.1 ANÁLISIS TÉCNICO

##### 4.1.1 LA COMPARACIÓN HIDRÁULICA DE UN POZO DE DIÁMETRO REDUCIDO A UNO CONVENCIONAL ES LA SIGUIENTE:

- A diferencia de la sarta convencional para primera y segunda etapa de perforación, se utilizará una sarta compuesta por: Tubos Lastrabarrenas de 8" y 6 1/2" respectivamente y tubería de revestimiento de 5 1/2"; la cual presenta mayor caída de presión en el Espacio Anular, debido al pequeño espacio en este, especialmente en sistemas de muestreo continuo.
- En la sarta convencional del 70 % al 90 % de pérdida de presión en el sistema de circulación se presenta dentro de la sarta de perforación y a través de la barrena, mientras que en la perforación con T. R. de 5 1/2" tendremos del 70 % al 90 % de pérdida de presión en el sistema de circulación, presente en el Espacio Anular.
- Se manejarán gastos reducidos, para lograr tener un régimen de flujo laminar y minimizar las caídas de presión por fricción en el Espacio Anular.
- Pequeños aumentos en el gasto, pueden causar mayores cambios en la densidad equivalente de circulación (DEC), dejando problemas serios en el pozo.
- Con bajos valores de Viscosidad Plástica y Punto de Cedencia, se obtienen propiedades reológicas mínimas del lodo, lo cuál redundará en menores caídas de presión en el Espacio Anular.
- En situaciones críticas donde la densidad equivalente de circulación alcanzada con esta geometría, sea superior al gradiente de Fractura de la formación a la profundidad de la zapata, se recurrirá al uso de las barrenas bi-céntricas para aumentar el diámetro del agujero y así disminuir la caída de presión por fricción en el Espacio Anular.



- Grandes variaciones en la DEC, pueden causar problemas tales como: 1) manifestaciones y reventones, 2) cierre del pozo, 3) pérdida de circulación y 4) daño excesivo de la formación.
- Los reductores de fricción que mantienen al fluido de perforación en flujo laminar pueden reducir significativamente la caída de presión.
- Altas velocidades de rotación de la sarta (300 a 800 rpm ) pueden causar que los sólidos perforados y los materiales pesados se acumulen en forma de placas debido a las altas fuerzas centrífugas, por esto se incrementan las caídas de presión.
- La descentralización de la sarta de perforación causa hasta el 60 % de caída de presión en el Espacio Anular.
- Altas velocidades en el Espacio Anular mejoran la remoción de los recortes.
- Los claros pequeños alrededor de las uniones incrementan la caída de presión y pueden causar erosión del agujero.
- Las limitaciones en el ritmo de flujo del motor de fondo pueden conducir a problemas de limpieza en el agujero.

## 4.2 ANÁLISIS DE OPERACIÓN

Para poder observar las diferencias en todo el proceso operativo, durante la perforación con la técnica del “Casing Drilling” es preciso dar una breve descripción del proceso de perforación, para poder comparar las actividades que son similares durante la perforación del pozo, pero que se realizan mediante una nueva técnica.

Así mismo se muestran las modificaciones que se han tenido que implementar en el equipo de perforación, para aplicar satisfactoriamente esta tecnología.

#### 4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PERFORACIÓN

En este nuevo proceso de perforación, la rotación que se aplica a la barrena es transmitida al rotar la tubería de revestimiento, la cual a su vez la trasmite el aparejo de fondo (WRBHA), la transmisión de la rotación de la tubería de revestimiento al ensamble WRBHA se efectúa a través de un niple “no go” el cual se ubica en el fondo de la tubería de revestimiento, este es un niple con perfil para que se alojen las cuñas axiales y torsionales del WRBHA, este niple tiene la capacidad de transmitir la torsión y la fuerza sobre la barrena, debido a que el peso sobre la barrena lo proporciona la tubería de revestimiento.

El ensamble de fondo esta compuesto de barrena, ampliadora hidráulica, herramienta colgadora mecánica con cuñas para asegurar la carga axial y torsional, empacador hidráulico y herramienta soltadora (WRBHA). Este ensamble es recuperable con cable de acero de 5/8”, a este ensamble se le puede incorporar motor de fondo, MWD y/o LWD, lastrabarras antimagnéticos y herramientas necesarias para navegación.

La recuperación y/o introducción del WRBHA se efectúa a través de la tubería de revestimiento, utilizando una herramienta soltadora y/o recuperadora, introducida con cable de acero, ambas herramientas son mecánicas, el proceso consiste en introducir el ensamble de recuperación hasta la cabeza de pesca del colgador mecánico del WRBHA, se opera la herramienta como un proceso normal de pesca y posteriormente se recupera en superficie todo el ensamble WRBHA, se procede al cambio de barrena y se introduce nuevamente a través de la tubería de revestimiento hasta que las cuñas del ensamble del WRBHA se alojan en el niple “no go” de la tubería de revestimiento, procediendo a soltar la herramienta, se recupera el cable y se reanuda el proceso de perforación, este cambio de barrena y/o herramientas del WRBHA se realiza en un tiempo de una hora, teniendo una velocidad de viaje de recuperación del WRBHA de 500 pies por minuto o sea de cinco a diez veces más rápido que el utilizado en un viaje convencional.

Con la herramienta recuperadora se estima que se puede utilizar hasta en ángulos de cuarenta grados, para mayores inclinaciones se diseña otro tipo de herramienta, la cual es centralizada y opera con bombeo.

La transmisión de la rotación en superficie se efectúa utilizando un Top Drive, el cual es de diseño especial ya que permite que el cable de acero pase a través de él, pudiendo así circular y mover la tubería mientras se recupera el WRBHA.

Según observación empírica, la torsión generada en la perforación con tubería de revestimiento es menor a la que se obtuviera si se perforara con tubería de trabajo, lo anterior se basa en la observación que se ha tenido durante los pozos experimentales, según técnicos de la compañía Tesco Inc. Lo anterior puede ser debido a que durante la perforación con tubería de revestimiento se genera menor pandeo o sea se mantiene más rígida la tubería generando un agujero más uniforme, teniendo como consecuencia menores esfuerzos torsionales.

El programa de simulación de torsión que utilizan es el de la compañía Maurer similar al que tenemos, a la fecha no han validado los resultados obtenidos en el simulador con los experimentales.

#### **4.2.1.1 Selección de juntas.**

La selección de las juntas de la tubería de revestimiento se apoyó en un estudio experimental de fatiga, el cual consistió en rotar las diferentes juntas que existen en el mercado a un ángulo de doce grados, las dos juntas que lograron pasar esta prueba fueron HD511 y la Butres modificada. (se solicitó más información al respecto, la cual no fue proporcionada por confidencialidad).

La rosca HD511 fue seleccionada, además de lo anteriormente descrito, por las siguientes razones; la rosca es normalmente utilizada en linner de perforación, linner horizontales y tubería lavadora, además presenta las siguientes características, el diámetro de la caja es ligeramente mayor al diámetro del tubo y el diámetro interno es ligeramente menor al diámetro interno del tubo.

La rosca Butress modificada fue seleccionada, además de pasar la prueba experimental, por las siguientes razones; el cople provee centralización de la tubería de revestimiento, se tiene un diámetro de paso uniforme, es más barata, durante las pruebas de laboratorio mostró mayor vida útil debido a que su perfil genera menos esfuerzos a la fatiga, esta rosca es fabricada por un proveedor domestico.

#### **4.2.1.2 Circulación.**

Durante la perforación, el sistema circulatorio es el convencional con la diferencia que en el WRBHA existe un empacador hidráulico por medio del cual se logra la hermeticidad de la herramienta WRBHA y la tubería de revestimiento, también tiene puertos inferiores y superiores al elastomero para la comunicación hidráulica necesaria durante los viajes de introducción y extracción del WRBHA.

Como resultado de esta nueva manera de perforar, las caídas de presión se invierten a lo tradicionalmente establecido, esto es, con este sistema se tiene mayor caída de presión en el espacio anular que en el interior de la tubería de revestimiento. Esta variación nos conduce a que se maximice la energía hidráulica aplicada a la barrena, así mismo se incrementa en forma exponencial la velocidad en el espacio anular. Estas aseveraciones nos conducen a perforar con mayores densidades equivalentes de circulación. Lo anterior trae como resultado la necesidad de menor potencia hidráulica para perforar.

#### **4.2.1.3 Toma de registros.**

La toma de registros en la perforación con revestimiento se puede ejecutar durante la perforación utilizando el equipo LWD. En caso de no querer tomarlo así se puede tomar después de la perforación levantando el revestimiento para liberar la zona de interés, recuperar la herramienta WRBHA, y proceder a tomar los registros con cable en forma convencional. Cabe aclarar que la toma de registros para este sistema de perforación es una de las operaciones que deben ser minimizadas para el mejor aprovechamiento de éste.

#### 4.2.1.4 Cementación de revestimientos.

Una vez alcanzada la profundidad programada del asentamiento del revestimiento, se recupera el WRBHA, dicha recuperación puede ser circulando y/o rotando. La cementación primaria de las tuberías de revestimiento se realiza bombeando inicialmente el tapón limpiador de fondo, posteriormente la lechada de cemento seguida por el tapón mecánico con cuñas de candado y el tapón de desplazamiento, los cuales se alojan en el niple donde se cuelga la herramienta WRBHA. Una vez verificada la llegada de los tapones de desplazamiento se represiona la tubería, de tal forma que se igualen las presiones y se cierra el interior de la T.R. durante el tiempo de fraguado. Los tapones de desplazamiento posteriormente son perforados con la siguiente tubería de revestimiento y herramienta WRBHA.

Los tapones utilizados son diseñados perforables con barrena PDC, el diseño y fabricación es patente de Tesco Inc., actualmente se diseña un tapón flotador así mismo se incursiona en la utilización de material no metálico que evite dejar pedazos de fierro durante la molienda.

A la fecha solo se ha reportado un caso en el cual no se pudo recuperar la herramienta WRBHA, debido a un pedazo de fierro del tapón de desplazamiento que se alojó en una de las aletas de la ampliadora, evitando así que se pudiera recuperar la herramienta WRBHA.

La centralización de la tubería de revestimiento se realiza a través de centradores rotatorios, esto es la tubería de revestimiento puede rotar en el interior del estabilizador. Se han probado diferentes formas de centralizar la tubería desde soldarle aletas hasta la utilización de los centradores anteriormente descritos.

#### 4.2.1.5 Corte de núcleos.

Con este sistema también se puede cortar y recuperar núcleos de fondo. Para lo cual en la herramienta WRBHA se coloca, en lugar de la barrena, la corona y el barril, introduciéndola con el colgador mecánico con cable y se aloja en el niple de la T.R., posteriormente se procede al corte del núcleo y la recuperación se efectúa de la misma forma como si se tratara de un cambio de barrena. Con este sistema se nuclea y se amplía en una operación continua logrando cortar núcleos de 30 a 60 pies por corrida.

## CAPITULO 5

### 5.- PROGRAMA HIDRÁULICO

#### INTRODUCCIÓN

En la perforación de pozos convencionales, el fluido de perforación es bombeado hacia el fondo del pozo por el interior de la sarta de perforación, saliendo por las toberas de la barrena y regresando hacia la superficie por el espacio anular. Durante la circulación, el fluido de perforación sirve para enfriar la barrena, estabilizar el agujero, controlar la presión de formación y limpiar el agujero mediante el acarreo de los recortes perforados a la superficie.

Los requerimientos hidráulicos para la perforación de pozos de diámetro reducido difiere de los empleados en la perforación convencional, debido a que la sarta de perforación frecuentemente es rotada a velocidades mucho mas altas (de 250-1000 rpm vs 50-150 rpm) y el área de flujo anular (claro radial) entre la sarta y la pared del pozo o la TR es mucho menor (0.25-0.5 pg vs 1 o mas pg). Debido a esto, durante la perforación de pozos de diámetro reducido la mayor perdida de presión por circulación en el sistema se presenta en el espacio anular (90%), mientras que en la convencional se presenta dentro de la sarta.

La capacidad hidráulica es determinada por el equipo del sistema de circulación, el cual consiste de una bomba para mover el fluido de perforación, una sección continua de mangueras, tuberías para transportar el fluido hacia la barrena y un tanque para mantener una reserva de abastecimiento del fluido de perforación.

#### 5.1 OPTIMIZACIÓN DE LA HIDRÁULICA

La hidráulica en la perforación de pozos de diámetro reducido puede ser optimizada por la determinación de las propiedades del fluido de perforación, requerimientos de velocidad anular, potencia hidráulica en la barrena, fuerza de impacto sobre el fondo del agujero y velocidad de las toberas.

Para la exitosa perforación pozos de diámetro reducido, se deben seleccionar adecuadamente las dimensiones del espacio anular, las características reológicas del lodo de perforación, el ritmo de flujo del lodo de perforación y el diámetro de las toberas de la barrena; a fin de obtener:

1. Suficiente distribución de los recortes perforados a lo largo del espacio anular sin aglomerarse:
  - Mantener al lodo de perforación en el espacio anular tan uniforme como sea posible.
  - Mantener la velocidad anular por arriba de la velocidad de sedimentación o asentamiento de los recortes.
  - Minimizar los efectos adversos de rotación en la sarta de perforación.
2. Un pozo estable:
  - Un gradiente de velocidad pequeño minimiza el esfuerzo de corte en la pared del pozo lo cual reduce la erosión del agujero
  - Mantener la presión del espacio anular por abajo de la presión de fractura de formación.
  - Minimizar la reacción entre el lodo y la formación.
3. Optimizar el comportamiento de la barrena:
  - Maximizar el ritmo de flujo en la velocidad de las toberas o la fuerza de impacto
  - Minimizar el ritmo de flujo para enfriar la barrena
  - Minimizar el ritmo de flujo para prevenir taponamiento de las toberas de la barrena.
4. Optimizar el empleo de la potencia de superficie:
  - Elegir apropiadamente las propiedades reológicas del lodo.
  - Ritmo de flujo apropiado del lodo de perforación

## 5.2 VELOCIDAD ANULAR Y LIMPIEZA DEL AGUJERO

La velocidad anular óptima debe ser mucho mayor que la velocidad de asentamiento de los recortes perforados, la velocidad neta de los recortes es la diferencia entre estas dos velocidades figura 4.1

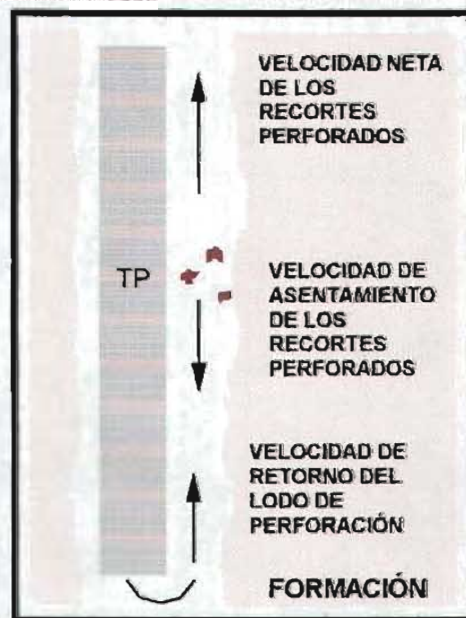


Figura 5.1 Velocidad de los recortes perforados

La velocidad de asentamiento de los recortes es una función del tamaño, densidad y forma de los recortes, densidad y propiedades reológicas del lodo de perforación. La velocidad anular es definida como la velocidad promedio del lodo en el anular, entre las dimensiones de la sarta de perforación y el agujero o la pared de la TR es calculado como:

$$V = \frac{24.5Q}{D_H^2 - D_P^2} \quad (5-1)$$

Donde:  $V$  = Velocidad anular (ft/mín)

$Q$  = Gasto (gpm)

$D_H$  = Diámetro interior del agujero (pg)

$D_P$  = Diámetro exterior de tubería de perforación (pg)

La tendencia general para la mayoría de los ingenieros es diseñar un programa hidráulico, empleando la máxima potencia disponible en las bombas del equipo. Esta técnica particular es llamada "optimización del equipo". Aunque esto es importante, las condiciones del agujero deben de ser usados como factores de diseño, esto es especialmente aplicable en la hidráulica de agujeros reducidos. Además de las propiedades del lodo, la velocidad anular es el factor mas importante que afecta al agujero durante las operaciones de perforación.

Una alta velocidad anular puede dejar una erosión excesiva del agujero e inestabilidad del pozo. Como resultado de esto, la selección correcta en la mayoría de los casos de perforación convencional y en los casos de agujeros reducidos es elegir la velocidad anular mas baja y que puede limpiar el agujero. La figura 2, muestra un conjunto de curvas desarrolladas por Hal Fullerton que presentan la velocidad anular optima basada en el diámetro del agujero y el promedio de las propiedades del lodo con varias densidades.

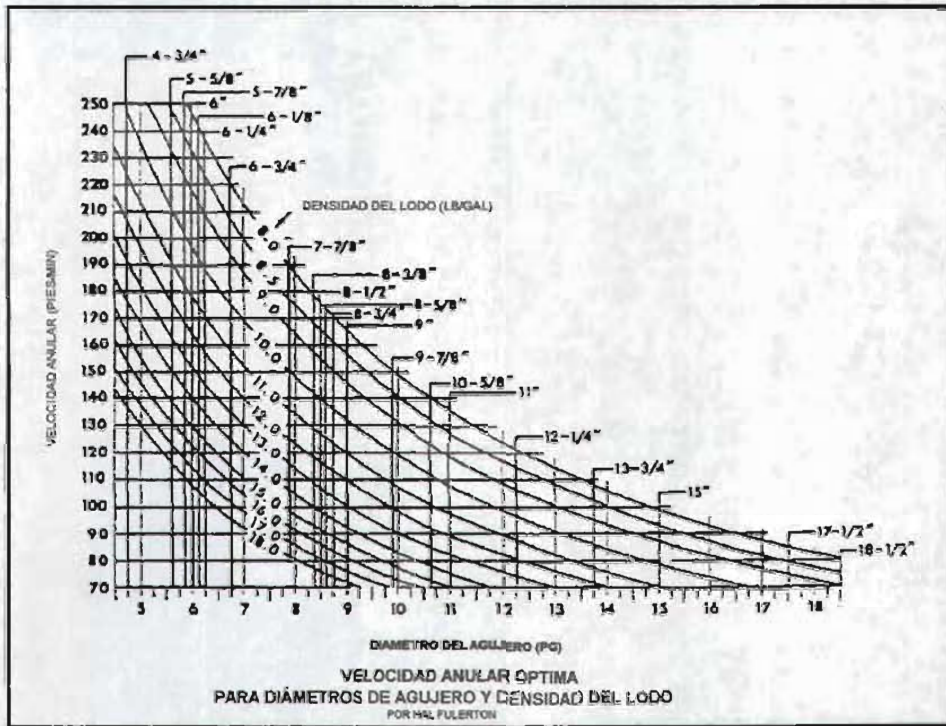


Figura 5.2 Nomograma para determinar la velocidad anular óptima

## 5.3 PERFIL DE LA VELOCIDAD ANULAR

El perfil de la velocidad anular depende del régimen de flujo del fluido de perforación, propiedades reológicas del lodo, excentricidad y rotación de la sarta de perforación en el agujero.

### 5.3.1 Régimen de flujo.

El perfil de velocidad del fluido de perforación en el espacio anular depende del régimen de flujo. Si el régimen de flujo es turbulento, el perfil de velocidad será relativamente uniforme (bueno) pero la velocidad del fluido cerca de la pared del agujero es alta, lo cual causa erosión del agujero en formaciones suaves (esto no es bueno), resultando una alta caída de presión lo cual puede llevar a altas DCE (esto no es bueno). Si el régimen de flujo es laminar, el perfil de velocidad depende de la reología del lodo.



### 5.3.2 Reología del lodo.

Principalmente son tres los modelos reológicos utilizados para estudiar los diferentes tipos de lodos, los cuales se basan en las propiedades de esfuerzo cortante y están referidas al índice reológico "n". Los fluidos con  $n < 1$  son referidos como de esfuerzo cortante suave o pseudoplásticos y son llamados Ley de Potencias. Los fluidos con  $n > 1$  son referidos como de esfuerzo cortante espeso o dilatantes y son llamados Plásticos de Bingham. Los fluidos con  $n = 1$  son llamados Newtonianos. La figura 3 nos muestra el perfil de velocidad de los diferentes tipos de fluido en régimen laminar. La selección adecuada de las propiedades, tales como alto punto de cedencia YP para lodos de Bingham o valores bajos de "n" para lodos de Ley de Potencia, puede resultar en una amplia zona de velocidad constante.

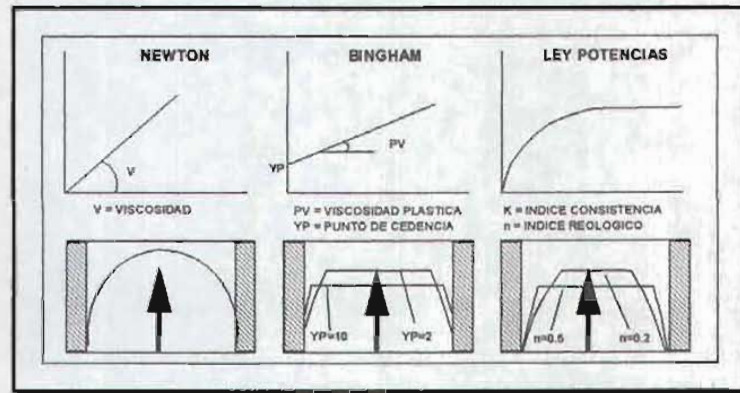


Figura 5.3 Modelos del perfil de velocidad

### 5.3.3 Excentricidad de la sarta de trabajo

Durante las operaciones de perforación, la rotación de la sarta no permanece centrada en el pozo. En la perforación convencional, donde la relación del diámetro exterior de la sarta al diámetro interior del agujero es menor a 0.75, la excentricidad de la sarta de perforación distorsiona el perfil de la velocidad y tiene un pequeño efecto sobre la pérdida de presión en el anular. Sin embargo, en la perforación de pozos de diámetro reducido donde la relación de diámetros es mayor a 0.75, la excentricidad de la sarta afecta significativamente al perfil de velocidad y a la pérdida de presión anular.

La figura 4 nos muestra el efecto relativo de la tubería excéntrica sobre el perfil de velocidad.

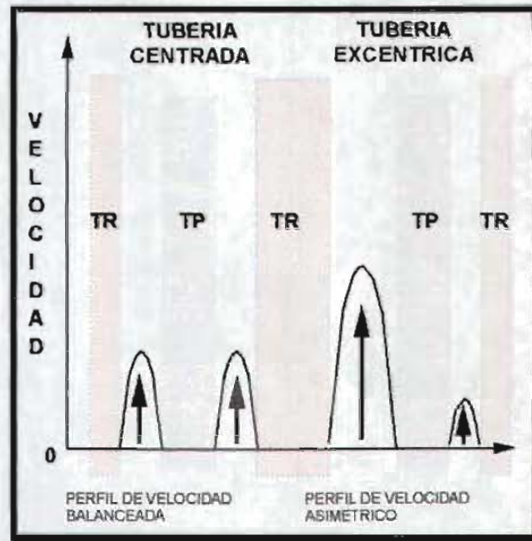


Figura 5.4 Perfil de velocidad asimétrica debido a la excentricidad de la tubería

### 5.3.4 Esfuerzo de corte en el pozo.

La determinación del esfuerzo de corte es crítica en pozos de diámetro reducido debido a la circulación del fluido, especialmente en formaciones suaves, el ritmo de corte es igual a:

$$\frac{dv}{dy} = \frac{2.4V}{(D_H - D_P)} \quad (\text{Modelo de Bingham}) \quad (5-2)$$

$$\frac{dv}{dy} = \left[ \frac{f_p V^2}{31000 K} \right]^{1/n} \quad (\text{Modelo de Ley de Potencias}) \quad (5-3)$$

y el esfuerzo de corte  $\tau$  en la pared del anular es:

$$\tau = \frac{3(D_H - D_P)\Delta P}{L} \quad (5-4)$$

$\tau$	=	Esfuerzo de corte en la pared del Espacio Anular (lbs/pie <sup>2</sup> )
$\Delta P$	=	Caida de presión (psi)
$L$	=	Longitud (pies)
$D_H$	=	Diámetro interior del agujero (pg)
$D_P$	=	Diámetro exterior de tubería de perforación (pg)
$\frac{dv}{dy}$	=	Ritmo de corte (seg <sup>-1</sup> )
$V$	=	Velocidad anular promedio (pies/seg)
$f$	=	Factor de fricción (cp)
$\rho$	=	Densidad del lodo (lbs/gal)
$k$	=	Factor de consistencia (lbs/100 pie <sup>2</sup> rpm)
$n$	=	Índice de comportamiento de flujo

## 5.4 PERDIDA DE PRESIÓN ANULAR

Es muy importante minimizar la pérdida de presión por circulación total para minimizar el consumo de potencia, así como, minimizar la pérdida de circulación anular a fin de mantener la presión anular por abajo de la presión de fractura de formación.

La pérdida de presión anular depende de la reología del lodo, dimensiones anulares y régimen de flujo. Todos los factores son interrelacionados y cualquier cambio en uno puede afectar a los otros. Generalmente, la determinación de la pérdida de presión anular esta basada en el régimen de flujo el cual es determinado por la comparación de la velocidad de flujo anular a la velocidad crítica  $V_c$ . La velocidad de flujo sobre la velocidad crítica implica que el flujo sea turbulento.

Para un fluido plástico de Bingham, la velocidad crítica es igual:

$$V_c = \frac{64.57PV + 64.57\sqrt{(PV)^2 + 9.9\rho(D_H - D_P)^2 YP}}{\rho(D_H - D_P)} \quad (5-5)$$

La caída de presión anular en flujo laminar ( $V < V_c$ )

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{YP}{282(D_H - D_P)} + \frac{PV(V)}{90,000(D_H - D_P)^2} \quad \text{(Flujo laminar)} \quad (5-6)$$

Y la caída de presión anular en flujo turbulento ( $V > V_c$ )

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{f \rho V^2}{93,000(D_H - D_P)} \quad (\text{Flujo turbulento}) \quad (5-7)$$

Esto es posible, para definir las dimensiones óptimas del anular con el propósito de minimizar la pérdida de presión anular para un régimen de flujo dado y el ritmo de penetración.

Recientes trabajos han sido realizados para determinar la pérdida de presión por circulación en agujeros reducidos donde la influencia del “efecto de Couette” y la excentricidad son considerados.

$$DP = \rho(fL\theta_{anular}) \left( \frac{V^2}{2} \right) \Delta L \Psi \quad (5-8)$$

- Donde:
- $V_c$  = Velocidad crítica para flujo turbulento (Espacio Anular) (pies/min)
  - $PV$  = Viscosidad plástica (cp)
  - $\rho$  = Densidad del lodo (lbs/gal)
  - $D_H$  = Diámetro interior del agujero (pg)
  - $D_p$  = Diámetro exterior de tubería de perforación (pg)
  - $\frac{\Delta P}{L}$  = Caídas de presión por unidades de longitud (psi/pie)
  - $L$  = Longitud (pies)
  - $V$  = Velocidad anular promedio (pies/min)
  - $PV$  = Viscosidad plástica (cp)
  - $YP$  = Punto de cedencia (lbs/100pies<sup>2</sup>)
  - $f$  = Factor de fricción (cp)
  - $DP$  = Caídas de presión por circulación
  - $\theta_{anular}$  = Diámetro Hidráulico
  - $\Delta L$  = Coeficiente “Couette” (trayectoria helicoidal del fluido)
  - $\Psi$  = Coeficiente “Crescent” (excentricidad de la sarta de perforación en el agujero)

### 5.4.1 Rotación de la sarta

La mayoría de los modelos hidráulicos están basados en diámetros de agujero convencional y no consideran el efecto de rotación de la sarta con claros anulares pequeños. La rotación de la sarta tiene un efecto sobre el perfil de velocidad cuando el claro anular es reducido. Este efecto es generalmente ignorado en la perforación convencional, pero puede ser significativo en la perforación de diámetro reducido. En claros anulares pequeños, la rotación de la sarta afecta la trayectoria del lodo y los recortes. Por un efecto viscoso llamado efecto de "Couette", la rotación de la sarta obliga al lodo a estar en rotación. Debido a este efecto, la trayectoria resultante del lodo y los recortes perforados son helicoidales. Este efecto de resorte causa en el perfil de velocidad un incremento en la longitud efectiva durante la trayectoria del lodo de retorno así como el viaje de los recortes. Esto causa dos problemas potenciales: 1) la longitud de retorno en la trayectoria del lodo incrementa la caída de presión anular y 2) La fuerza de transporte de los recortes se reduce debido a que el fluido de perforación se mueve directamente contrario al efecto de la gravedad.

El desarrollo del efecto de "Couette" depende de las propiedades reológicas del lodo, régimen de flujo, gasto, velocidad de rotación de la sarta, diámetro de la sarta y claro anular. Si el régimen de flujo anular es turbulento, la rotación de la sarta no afecta al área total anular y el efecto de "Couette" es pequeño. Mas aun, en lodos viscosos es mas probable que se presente flujo laminar y es mas importante el efecto de "Couette".

La determinación del límite entre el flujo laminar y el flujo turbulento es dificultoso debido a que el flujo axial y tangencial no son independientes.

### 5.4.2 Excentricidad de la tubería.

La excentricidad de la tubería también afecta la caída de presión anular, en operaciones de perforación convencional, la magnitud del efecto es insignificante, sin embargo, con pozos de diámetro reducido, el efecto puede ser substancial.

### 5.4.3 Densidad de circulación equivalente

Cuando el lodo esta estático en el pozo, este ejerce una presión hidrostática en el pozo igual a:

$$P=0.052 dw \quad (5-9)$$

Donde: P = Presión del fluido (psi)  
 d = Profundidad vertical del pozo (pies)  
 W = Peso del lodo (lb/gal)

En un pozo de 10,000 pies, la presión del fluido se incrementa desde cero en la superficie hasta 5200 lb/pg<sup>2</sup> en el fondo del pozo. Similarmente, un lodo de 12 lb/gal ejerce una presión de 6240 lb/pg<sup>2</sup> en el fondo del pozo. La presión del fluido en el fondo del pozo se incrementa cuando el pozo es circulado, esto es debido al abatimiento de presión en el espacio anular ( $\Delta Pa$ ). En el ejemplo de la figura 5, la circulación del fluido produce una caída de presión en el anular de 1040 lb/pg<sup>2</sup>, incrementándose la presión en el fondo del pozo hasta 6240 lb/pg<sup>2</sup>.

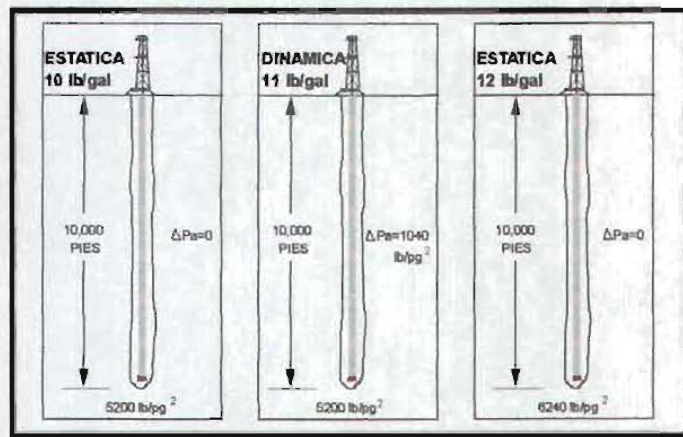


Figura 5.5 Presión dinámica y estática del pozo.

Los 6240 lb/pg<sup>2</sup> de presión en el fondo del pozo cuando se circula un lodo de 10 lb/gal es idéntico a los 6240 lb/pg<sup>2</sup> ejercida por una columna estática de un lodo de 12 lb/gal, por lo que la DCE en este caso es de 12 lb/gal, incluso aunque el peso del lodo actual sea de 10 lb/gal. El concepto de la DCE es importante porque es un fácil camino para determinar el peso de lodo necesario para mantener estable el pozo, previniendo un amago de reventón, y para prevenir el fracturamiento hidráulico y la pérdida de circulación.

La densidad de circulación equivalente puede ser calculada como sigue:

$$DCE = w + \frac{\Delta Pa}{0.052d} \quad (5-10)$$

Donde:  $DCE$  = Densidad Equivalente de Circulación (lb/gal)  
 $w$  = Peso del lodo (lb/gal)  
 $d$  = Profundidad vertical del pozo (pies)  
 $\Delta Pa$  = Caída de presión en el Espacio Anular (psi)

Generalmente, el peso del lodo en el pozo puede ejercer la suficiente presión hidrostática para controlar la presión de poro y el esfuerzo de la roca sin que exceda la resistencia a la fractura de la roca. Cuando el lodo es circulado, la presión anular se incrementa, incrementándose la DCE. Si la DCE excede la resistencia a la fractura de la roca, la roca podría fracturarse hidráulicamente y la pérdida de circulación ocurrirá.

En operaciones de perforación convencional, del 70 al 90% de pérdida de presión en el sistema de circulación se presenta dentro de la sarta de perforación y a través de la barrena, así que cualquier cambio en el ritmo de producción produce pequeños cambios en la DCE. Sin embargo, en operaciones de perforación de diámetro reducido, donde el 70 al 90% de pérdida de presión en el sistema de circulación se presenta en el anular, pequeños cambios en el ritmo de flujo pueden causar mayores cambios en el DCE, dejando problemas serios en el pozo. Por ejemplo, en un pozo de 10,000 pies con un lodo de 12.4 lb/gal y una pérdida de presión anular de 350 lb/pg<sup>2</sup> y 1500 lb/pg<sup>2</sup>, respectivamente para pozos convencionales y de diámetro reducido, la densidad equivalente a una profundidad de 10,000 pies es:

$$DCE = 12.4 + \frac{350}{0.052 * 10000} = 13.1(\text{lb} / \text{gal}) \quad (5-11)$$

$$DCE = 12.4 + \frac{1500}{0.052 * 10000} = 15.3(\text{lb} / \text{gal}) \quad (5-12)$$

Esto nos muestra que la circulación en un pozo convencional incrementa la DCE de 12.4 a 13.1 lb/gal mientras que en pozos de diámetro reducido, la DCE se incrementa de 12.4 a 15.3 lb/gal. Esta alta DCE en pozos de diámetro reducido posiblemente podría fracturar la formación y causar problemas por pérdida de circulación. Grandes cambios en la DCE son mayores los problemas con los sistemas de muestreo continuo debido al pequeño anular. La tabla 4.1, nos muestra un caso de campo donde la pérdida de presión anular se incrementó de 106 hasta 1176 lb/pg<sup>2</sup> cuando el ritmo de flujo fue incrementado de 11 hasta 40 gal/min. Esto causó un incremento en la DCE de 7.8 hasta 10.7 lb/gal. Este cambio grande en la DCE puede crear mayores problemas con la estabilidad del pozo, control del pozo y pérdida de circulación en agujeros muestreados continuamente.

Tabla 5.1 Perdida de presión anular

GASTO (gal/min)	DCE (lb/gal)	PRESIÓN DE BOMBEO (lb/pg <sup>2</sup> )	PRESIÓN ANULAR (lb/pg <sup>2</sup> )
11	7.8	121	106
13	7.9	164	145
16	8.1	241	214
19	8.3	331	294
23	8.7	471	420
27	9.1	634	566
31	9.5	820	732
35.5	10.1	1055	947
40	10.7	1323	1176

## 5.5 REMOCIÓN DE RECORTES

La función primaria del fluido de perforación es proporcionar el suficiente gasto para remover efectivamente los recortes perforados del pozo. Debido a que los recortes generalmente son mas densos (pesados) que el lodo, estos caen hacia el fondo del pozo a través del lodo en el espacio anular. La velocidad ascendente neta de las partículas recortadas es por lo tanto la diferencia entre la velocidad ascendente del fluido y la velocidad descendente de asentamiento de los trozos recortados. Como resultado, el ritmo de flujo del lodo y las propiedades reológicas deben ser controlados para compensar esta tendencia de asentamiento.

### Correlación de Moore

$$V_s = \frac{113.4 D_p (\rho_p - \rho_f)}{C_d \rho_f} \quad (5-13)$$

- Donde:  $V_s$  = Velocidad de asentamiento de la partícula (pies/min)  
 $D_p$  = Diámetro de la partícula (pg)  
 $\rho_p$  = Densidad de la partícula (lbs/gal)  
 $\rho_f$  = Densidad del fluido de perforación (lbs/gal)  
 $C_d$  = Coeficiente de arrastre



El coeficiente de arrastre puede ser determinado de la figura cuando el número de Reynolds es calculado por:

$$Np = \frac{15.47 \rho_p V_s D_p}{\mu} \quad (5-14)$$

Donde:  $V_s$  = Velocidad de asentamiento de la partícula (pies/min)  
 $D_p$  = Diámetro de la partícula (pg)  
 $\rho_p$  = Densidad de la partícula (lbs/gal)  
 $\mu$  = Viscosidad del fluido (cp)  
 $Np$  = Número de Reynolds de la partícula

#### Correlación de Chien

$$V_s = 0.0075 \left( \frac{\mu_a}{\rho_f D_p} \right) \left[ \frac{36800 D_p \left[ \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \right] + 1 - 1}{\left( \frac{\mu_a}{\rho_f D_p} \right)^2} \right] \quad (5-15)$$

Donde:  $V_s$  = Velocidad de asentamiento de la partícula (pies/mín)  
 $D_p$  = Diámetro de la partícula (pg)  
 $\rho_p$  = Densidad de la partícula (lbs/gal)  
 $\rho_f$  = Densidad del fluido de perforación (lbs/gal)  
 $\mu_a$  = Viscosidad aparente del fluido (Chien) (cp)

Para suspensiones de bentonita y agua, Chien recomienda usar la viscosidad plástica como aparente. Para fluidos de perforación con polímeros, la viscosidad aparente puede ser calculada por:

$$\mu_a = PV + 5\left(\frac{YPDp}{V}\right) \quad (5-16)$$

Donde:  $Dp$  = Diámetro de la partícula (pg)  
 $PV$  = Viscosidad Plástica (cp)  
 $YP$  = Punto de cedencia (lbs/100pies<sup>2</sup>)  
 $V$  = Velocidad del fluido (pies/seg)  
 $\mu_a$  = Viscosidad aparente del fluido (Chein) (cp)

## 5.6 AJUSTE DE UN MODELO REOLOGICO PARA EL CÁLCULO DE LA HIDRÁULICA.

### CALCULOS DE HIDRÁULICA ( MODELO LEY DE POTENCIAS)

#### 5.6.1 cálculo de “n” y “k”

$$n = 3.32 \log \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}}$$

$$K = \frac{5.11(\theta_{300})}{511^n} (\text{dinas} - \text{seg}^n / \text{cm}^2)$$

n=índice de Ley de Potencias

K=índice de consistencia

$\theta^{600}$  =lectura del dial a 600 RPM

$\theta^{300}$  =lectura del dial a 300 RPM

#### 5.6.2 cálculo de la velocidad del fluido espacio anular

interior de la tubería

$$V = \frac{24.51(Q)}{D_H^2 - D_O^2}$$

$$V = \frac{24.51(Q)}{D_I^2}$$

V=velocidad del fluido (pies/min)

Q=gasto de bombeo (gpm)

$D_H$ =diámetro interior del agujero (pg)

$D_O$ =diámetro exterior de la tubería (pg)

$D_I$ =diámetro interior de la tubería (pg)

### 5.6.3 cálculo del ritmo de corte espacio anular

$$\gamma_w = \frac{0.8 \left( 2 + \frac{1}{n} \right) V}{D_H - D_O}$$

$\gamma_w$ =ritmo de corte ( $\text{seg}^{-1}$ )

V=velocidad (pies/min)

$D_H$ =diámetro interior del agujero (pg)

$D_O$ =diámetro exterior de la tubería (pg)

$D_I$ =diámetro interior de la tubería (pg)

### interior de la tubería

$$\gamma_w = \frac{0.4 \left( 3 + \frac{1}{n} \right) V}{D_I}$$

### 5.6.4 cálculo del esfuerzo de corte

$$\tau_w = K (\lambda_w)^n$$

$\tau_w$ =esfuerzo de corte ( $\text{dinas/cm}^2$ )

K=índice de consistencia

$\gamma_w$ =ritmo de corte

n=índice de ley de potencias

### 5.6.5 cálculo de la viscosidad

$$\mu_w = \frac{(\tau_w)(100)}{\gamma_w}$$

$\mu_w$ =viscosidad (cps)

$\tau_w$ =esfuerzo de corte ( $\text{dinas/cm}^2$ )

$\gamma_w$ =ritmo de corte

### 5.6.6 cálculo del factor No-Newtoniano espacio anular

$$F = \frac{(2 + 1/n)}{3}$$

F=factor No-Newtoniano  
n=índice de ley de potencias

### interior de la tubería

$$F = \frac{(3 + 1/n)}{4}$$

### 5.6.7 cálculo del número de Reynolds espacio anular

$$N_{Re} = \frac{15.46 \rho V (D_H - D_O)}{\mu_W}$$

$N_{Re}$ =Número de Reynolds  
 $\rho$ =Densidad (libras/galon)  
V=velocidad (pies/min)  
 $D_H$ =diámetro interior del agujero (pg)  
 $D_O$ =diámetro exterior de la tubería (pg)  
 $D_I$ =diámetro interior de la tubería (pg)  
 $\mu_W$ =viscosidad (cps)

### interior de la tubería

$$N_{Re} = \frac{15.46 \rho V (D_I)}{\mu_W}$$

### 5.6.8 cálculo de $Z_1$ , $Z_2$ y $F_z$ ecuación 13

$$Z_1 = \frac{(9.57 + \log_e(n))}{30.297}$$

### ecuación 14

$$Z_2 = \frac{0.25}{n^{0.215}}$$

### ecuación 15

$$F_z = \frac{Z_1}{(N_{Re}^{Z_2})}$$

donde:  $Z_1$ =Factores de rugosidad  
 $Z_2$ =Factores de rugosidad  
 $F_z$ =Factor de fricción para flujo turbulento  
 $n$ =índice de ley de potencias  
 $N_{Re}$ =Número de Reynolds

### 5.6.9 cálculo de la velocidad crítica espacio anular ecuación 16

$$C_v = \left( \frac{194K}{\rho(D_H - D_O)} \right)^{\left(\frac{1}{2-n}\right)} \left( \frac{2.4}{(D_H - D_O)} \left( \frac{2n+1}{3n} \right) \right)^{\left(\frac{n-1}{2-n}\right)}$$

### interior de la tubería ecuación 17

$$C_v = \left( \frac{194K}{\rho D_I} \right)^{\left(\frac{1}{2-n}\right)} \left( \frac{1.6}{D_I} \left( \frac{3n+1}{4n} \right) \right)^{\left(\frac{n-1}{2-n}\right)}$$

donde:  $C_v$ =Velocidad crítica (pies/min)  
 $K$ =índice de consistencia (dinas-seg<sup>n</sup>/cm<sup>2</sup>)  
 $\rho$ =Densidad (libras/galón)  
 $n$ =índice de ley de potencias  
 $D_H$ =diámetro interior del agujero (pg)  
 $D_O$ =diámetro exterior de la tubería (pg)  
 $D_I$ =diámetro interior de la tubería (pg)

La ecuación 16 y 17 asumen que el número de Reynolds es de 3000 requerido para flujo turbulento

### 5.6.10 cálculo de las caídas de presión (para flujo laminar)

espacio anular  
ecuación 18

$$\left( \frac{6.96(10^{-4})(\tau_w)}{D_H - D_O} \right) L$$

interior de la tubería  
ecuación 19

$$\left( \frac{6.96(10^{-4})(\tau_w)}{D_I} \right) L$$

### 5.6.11 cálculo de las caídas de presión (para flujo turbulento)

espacio anular  
ecuación 20

$$\left( \frac{2.691(10^{-6})\rho F_z V^2}{D_H - D_O} \right) L$$

interior de la tubería  
ecuación 21

$$\left( \frac{2.691(10^{-6})\rho F_z V^2}{D_I} \right) L$$

### 5.6.12 cálculo de las caídas de presión en la barrena

#### a) cálculo de la velocidad en las toberas

$$V_N = \frac{(418.3)Q}{\sum D_i^2}$$

donde:  $V_N$  = velocidad en las toberas (pies/seg)

$Q$  = gasto de flujo (gpm)

$\sum D_i^2$  = sumatoria de los diámetros al cuadrado

#### b) cálculo de las caídas de presión en las toberas

$$\Delta P_N = \frac{156.8 \rho Q^2}{(\sum D_i^2)^2}$$

donde:  $P_N$  = caída de presión en las toberas (psi)

$\rho$  = densidad del fluido (libras/galón)

$Q$  = gasto de flujo (gpm)

$\sum D_i^2$  = sumatoria de los diámetros al cuadrado

### 5.7 CUADRO COMPARATIVO DE LAS CAÍDAS DE PRESIÓN POR FRICCIÓN

Profundida	$\Delta P$ Esp.Anular	$\Delta P$ Int.	$\Delta P$ Barrena	$\Delta P$ Conex.	$\Delta P$ Total
1871	252.8048	237.0375	1197.175275	59	1746.0176
1872	252.9399	237.1642	1197.175275	59	1746.2794
1873	253.0751	237.2908	1197.175275	59	1746.5412
1874	253.2102	237.4175	1197.175275	59	1746.8030
1875	253.3453	237.5442	1197.175275	59	1747.0648
1876	253.4804	237.6709	1197.175275	59	1747.3266
1877	253.6155	237.7976	1197.175275	59	1747.5884
1878	253.7507	237.9243	1197.175275	59	1747.8502
1879	253.8858	238.0510	1197.175275	59	1748.1120
1880	254.0209	238.1777	1197.175275	59	1748.3738
1881	709.3685	450.2001	87.2906	200	1446.8591
1882	709.7456	450.4394	87.2906	200	1447.4756
1883	710.1227	450.6787	87.2906	200	1448.0920
1884	710.4998	450.9181	87.2906	200	1448.7085
1885	710.8770	451.1574	87.2906	200	1449.3250
1886	711.2541	451.3968	87.2906	200	1449.9414
1887	711.6312	451.6361	87.2906	200	1450.5579
1888	712.0083	451.8754	87.2906	200	1451.1743
1889	712.3855	452.1148	87.2906	200	1451.7908
1890	712.7626	452.3541	87.2906	200	1452.4073

Tabla 5.2 Cuadro comparativo de las caídas de presión por fricción para un agujero convencional contra un agujero esbelto.

Como podemos apreciar en el cuadro anterior, de la profundidad de 1871 a 1880 m se perforó con una sarta de perforación convencional, es decir con diámetros que nos permiten tener una hidráulica de perforación donde tengamos la mayor caída de presión en la barrena, es decir que alcancemos valores aproximados del 68%, mientras que en el interior de la sarta solo tenemos un 14% y en el espacio anular otro 15% de la caída de presión total.

De la profundidad de 1881 hasta 2850 m se perforó con diámetros muy reducidos, esto quiere decir que se manejó una barrena de 4 3/4" y TP de 2 7/8", por lo tanto, en el comportamiento real no se manejaron los mismos porcentajes, manejados en la perforación convencional, ya que en la perforación de agujeros esbeltos, participan otros efectos como: efecto couette, excentricidad de la tubería y remoción de recortes, tal es la diferencia en el comportamiento que los porcentajes quedan de la siguiente manera: Caída de presión en Espacio Anular 49%, en el interior de la sarta 31% y en la barrena sólo el 7%, el 13% restante corresponde a las conexiones superficiales de control.

### 5.8 CAÍDAS DE PRESIÓN POR FRICCIÓN CALCULADAS EN CADA UNA DE LAS SECCIONES DEL APAREJO DE PERFORACIÓN CON AGUJERO ESBELTO.

A continuación mostramos una distribución de las caídas de presión por fricción, como son: interior de la sarta de perforación, en la barrena, en el espacio anular y las conexiones superficiales de control.

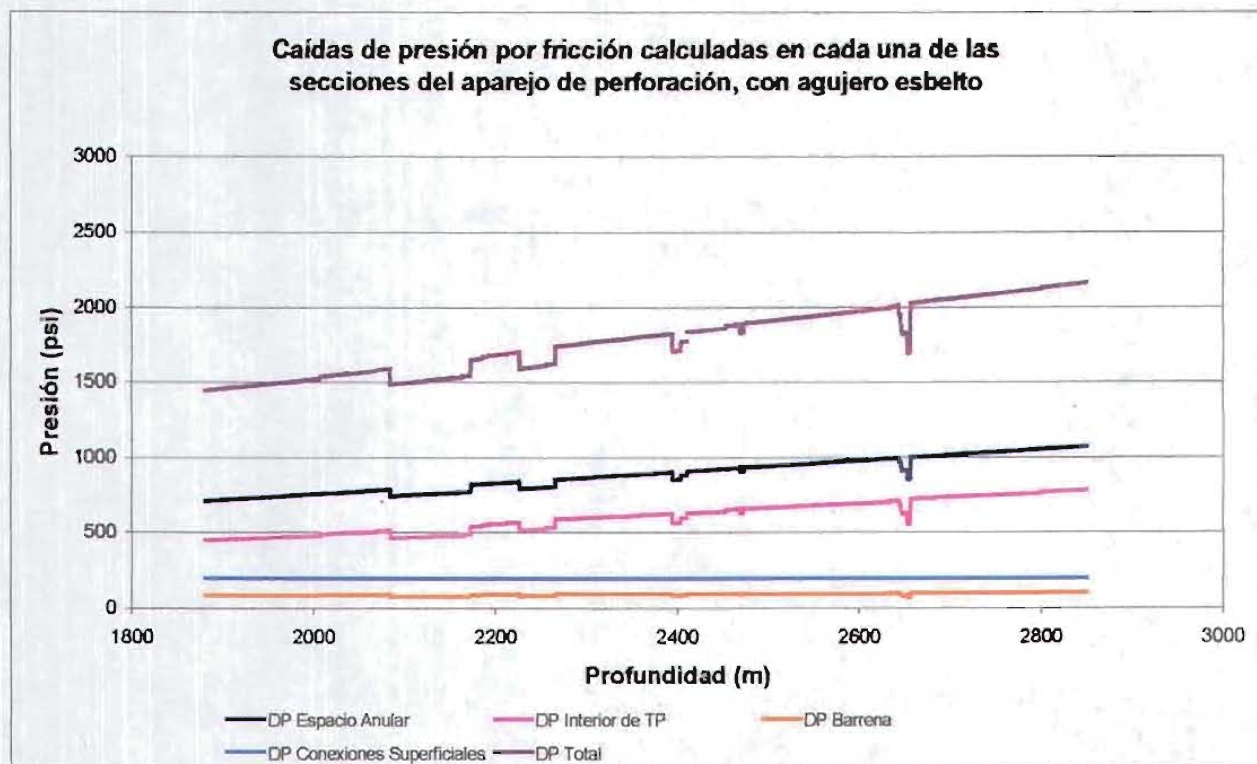


Figura 5.6 Caídas de presión por fricción calculadas en cada una de las secciones del aparato de perforación, con agujero esbelto.



## CAPITULO 6

### 6.1 EXCENTRICIDAD

Referente al cálculo de caídas de presión por fricción, abordaremos el tema de excentricidad, ya que en la perforación de pozos esbeltos deberá considerarse por el alto significado que representa en estos cálculos.

Para documentar este capítulo nos apoyamos en el artículo "Han Achúrate Slot-Flow Model for Non-Newtonian Fluid Flow Through Eccentric Annuli", escrito por Aniekan W. Iyoho, publicado en 1981 en el SPE.

**Un modelo de flujo exacto para flujo de fluidos no-newtonianos a través de espacios anulares excéntricos.**

Este nuevo modelo describe como obtener la solución analítica para el problema de flujo no-newtoniano a través de espacios anulares excéntricos.

Se presenta un análisis de la reología de fluidos no-newtonianos u desarrollo y solución de la ecuación diferencial aplicable usando el modelo de Ley de potencias y ranura no rectangular.

Los resultados indican que los valores de velocidad se reducen gradualmente al reducirse el área anular excéntrica. Esto es importante en la perforación direccional donde la tubería de perforación tiende a pegarse a uno de los lados del agujero.

El diseño del flujo de lodo para el transporte de recortes en base a la velocidad nominal promedio no puede adelantarse a los serios problemas asociados con la remoción de recortes, en la región de baja velocidad anular.

Otra aplicación práctica incluida en este trabajo es la determinación de la distribución de velocidad en el proceso involucrado en el flujo de fluido a través del espacio anular excéntrico.

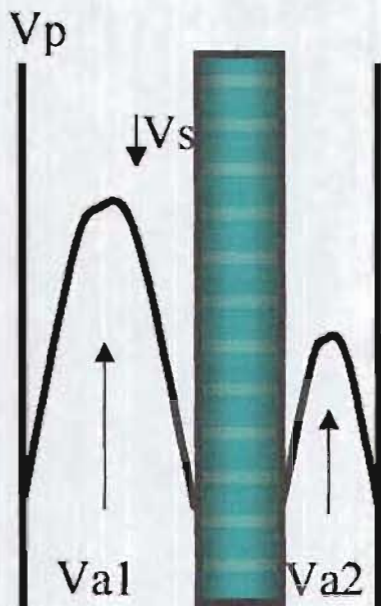
La principal ventaja para el aprovechamiento del método iterativo de diferencia finita usado por varios investigadores son trabajos que presentan líneas usadas o modelos lineales de lo cuál resultan perfiles de velocidad con aceptable exactitud, este estudio presenta ambos, el modelo exacto y la solución técnica.

## Introducción.

En la industria petrolera, los ingenieros continuamente encuentran flujo de fluidos newtonianos y no-newtonianos en espacios anulares excéntricos durante la perforación de pozos, en menor escala en la tubería de revestimiento de producción, empacamiento con grava y bombeo neumático.

Analizando el comportamiento de los recortes de perforación en el espacio anular del pozo, tradicionalmente se asume que la tubería de perforación y el agujero o tubería de revestimiento son concéntricos.

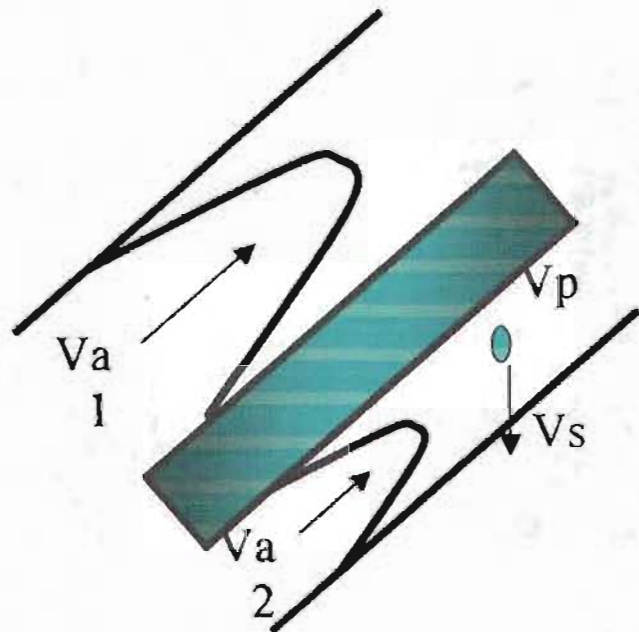
En la figura vemos que usualmente la tubería de perforación no es concéntrica con el agujero, especialmente durante la perforación direccional donde el peso de la tubería ocasiona que tienda a pegarse a un costado del agujero.



**CASO 1**

$$\theta = 0^\circ$$

**Figura 6.1.1**

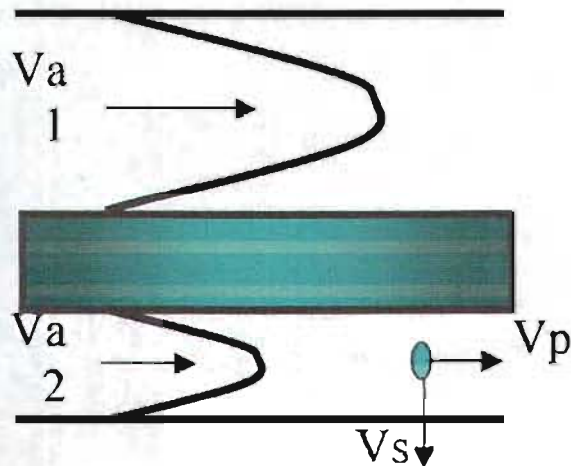


**CASO 2**

$$\theta = 45^\circ$$

**Figura 6.1.2**

Hence: Realiza una predicción del comportamiento de los recortes en el espacio anular, necesariamente incluyendo un análisis de la distribución de velocidad en el transporte de fluido, asumiendo varios niveles de excentricidad entre la tubería y el agujero.



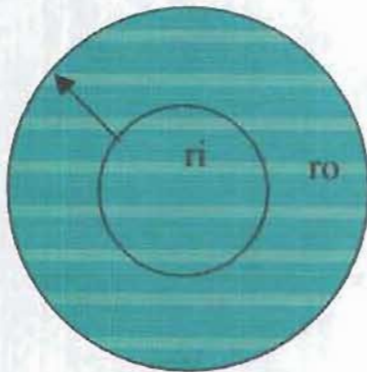
### CASO 3

$$\theta = 90^\circ$$

Figura 6.1.3

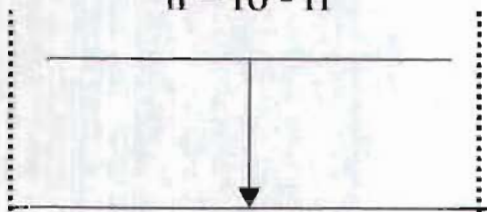
Para asegurar la aplicación de los resultados en campo es necesario evitar los modelos matemáticos complicados y soluciones analíticas indescifrables.

Desde hace mucho tiempo existen ecuaciones que describen el flujo de fluidos no-newtonianos a través de placas paralelas que generalmente permiten manejar ecuaciones convencionales de flujo anular, la excentricidad en el espacio anular se representa por una ranura rectangular como se muestra en las figuras siguientes:



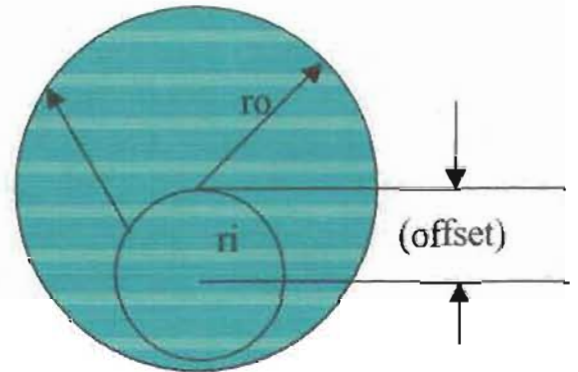
$h = A$  constante

$$h = r_o - r_i$$



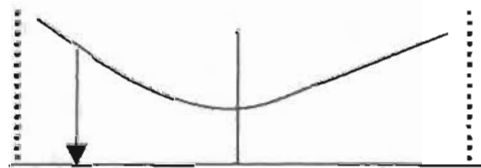
### ESPACIO ANULAR CONCENTRICO

Figura 6.1.4



$h =$  no es constante

$$c = r_o - r_i = A \text{ constante}$$



### ESPACIO ANULAR EXCENTRICO

Figura 6.1.5

La teoría asociada, resultados y aplicaciones son analizados en este artículo. Lo cual permite el uso de estos resultados en cualquier situación, los resultados se presentan en términos de relaciones adimensionales.

Uno de los primeros estudios sobre este tema fue presentado en 1955 por Tao y Donovan. Ellos mostraron el transporte de recortes, tanto en forma teórica como experimental el flujo laminar y turbulento a través de espacios anulares y muestran el flujo a través de espacios anulares con tubería rotando y esto puede ser tratado a altas velocidades de flujo a través del espacio anular y grandes longitudes con paredes estacionarias.

En 1959 Heyda realiza una investigación analítica sobre acarreo de recortes y distribución de velocidades en espacios anulares excéntricos, usando funciones de Green y coordenadas dipolares, resolvió la ecuación de Poisson para velocidades en puntos de flujo laminar incompresible y presenta estos resultados en forma de series infinitas, con esto no intenta desarrollar soluciones numéricas.

Tres años después, Redberger y Charles usan a Heyda para aprovechar y resolver la ecuación diferencial de segundo orden para velocidades puntuales. Para integrar los valores de velocidad. Ellos obtienen relaciones de flujo adimensionales para fluidos newtonianos incompresibles que fluyen a través de espacios anulares excéntricos de varias relaciones de: diámetro interior / diámetro exterior y excentricidades.

En 1965 Vaughn trata los espacios anulares excéntricos como una ranura de altura variable contrastando con los espacios anulares concéntricos donde si puede modelarse como una ranura con altura  $h$  constante.

Este autor muestra el flujo laminar axial en espacios anulares concéntricos donde puede ser modelado exactamente por una ranura rectangular proporcionando la relación de diámetros (diám. int. / diám. ext. =  $k$ ) donde  $k$  sea menor de 0.3. Este requerimiento es satisfecho por la mayoría de las operaciones de perforación.

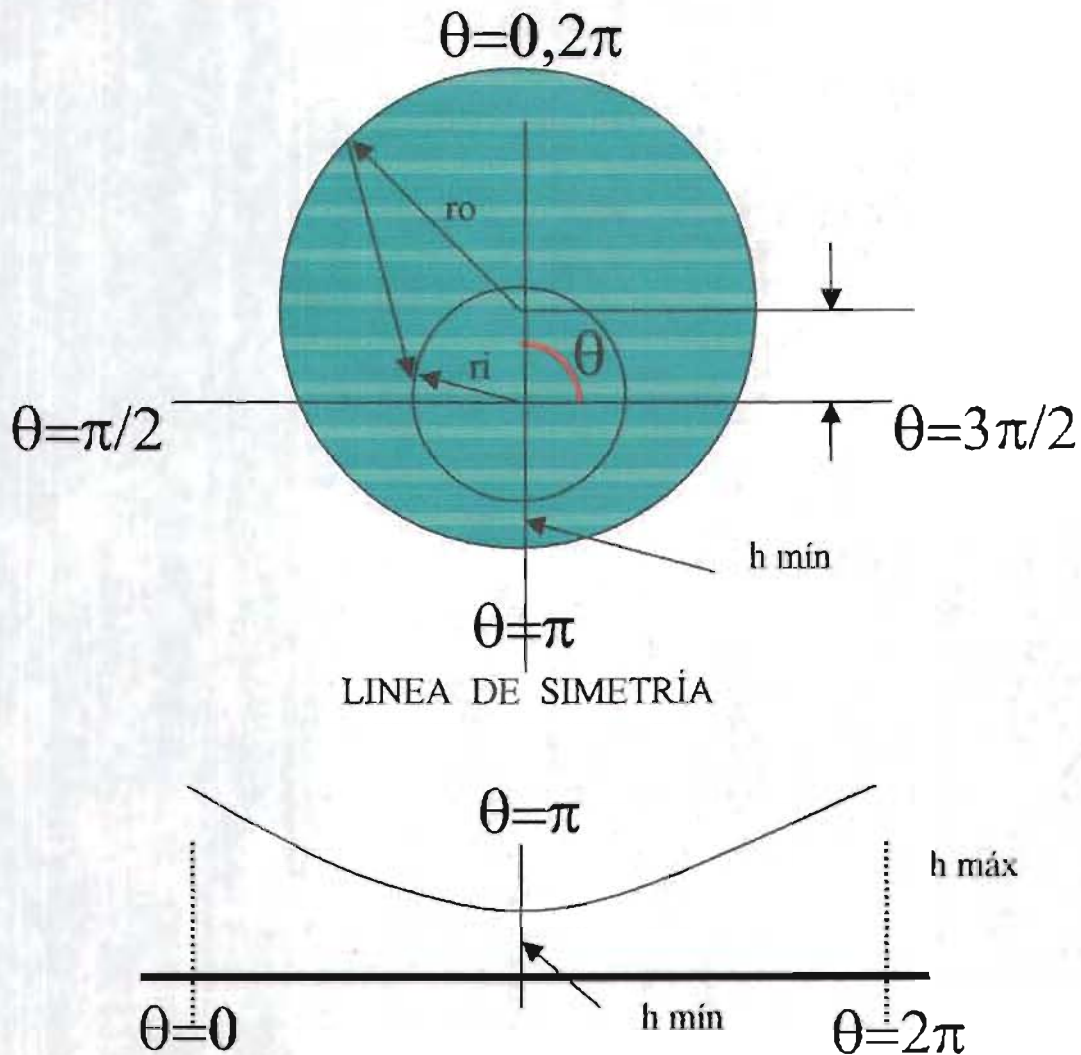
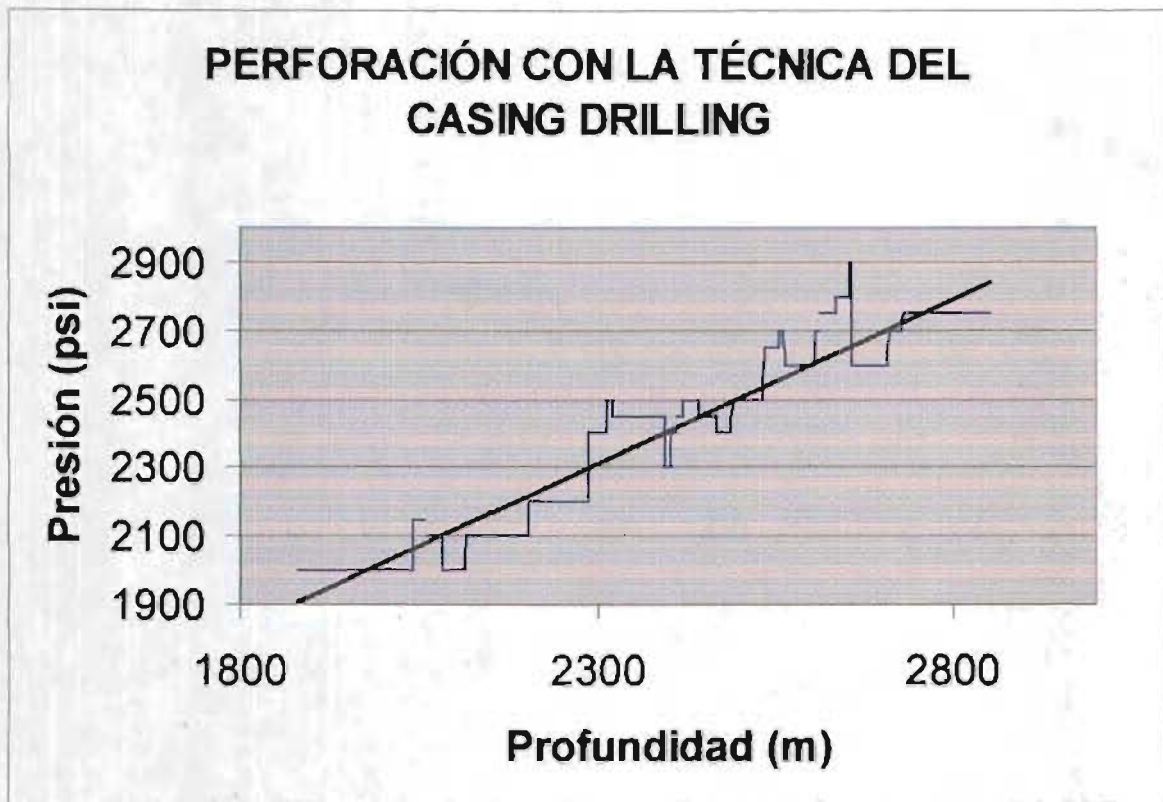
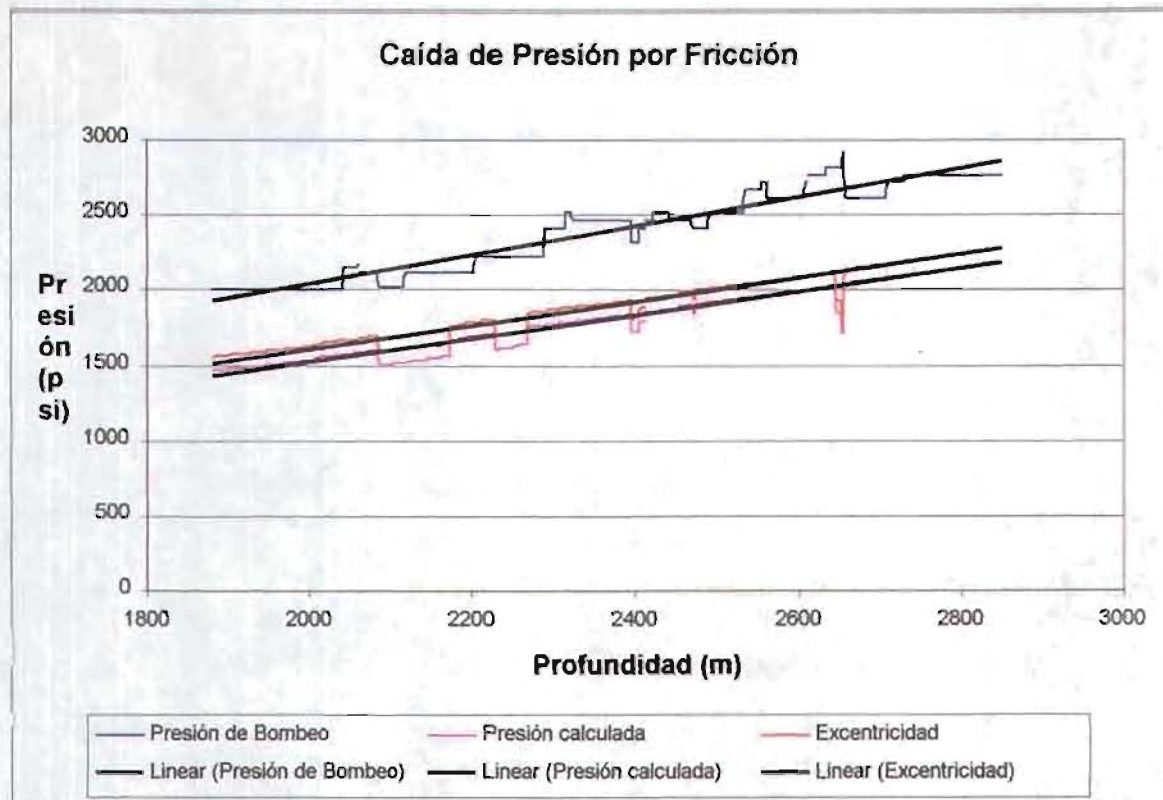


Figura 6.1.6

Gráfica 6.1.1



Gráfica 6.1.2



Usando este procedimiento, todos los valores de velocidad son calculados para espacios anulares excéntricos. La velocidad anular promedio "Va" también puede ser calculada con la versión modificada de la formula Ley de Potencias dada por Skelland para espacios anulares concéntricos.

$$q_c \equiv \frac{\pi n}{2n+1} \left( \frac{\Delta p}{KL} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{(r_o + r_i)}{2} (r_o - r_i)^2 \left( \frac{r_o - r_i}{2} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (6.1-1)$$

Dividiendo entre el área de la sección transversal del espacio anular  $\pi(r_o^2 - r_i^2)$ , la velocidad anular promedio para un espacio anular excéntrico se obtiene a partir de:

$$Va \cong \frac{n}{2n+1} \left( \frac{\Delta p}{KL} \right)^{\frac{1}{n}} \left( \frac{r_o - r_i}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} \quad (6.1-2)$$

De acuerdo al autor Aniekan W. Iyoho, la distribución de velocidades en el proceso involucrado en el flujo de fluidos a través de espacios anulares excéntricos, se representa por una ranura rectangular como se mostró en la figura (7.5), y esta velocidad anular promedio nos sirve para calcular las caídas de presión involucrando la excentricidad.

Cálculo de las caídas de presión (para flujo laminar)

espacio anular  
ecuación 18

interior de la tubería  
ecuación 19

$$\left( \frac{6.96(10^{-4})(\tau_w)}{D_H - D_o} \right) L \quad \left( \frac{6.96(10^{-4})(\tau_w)}{D_I} \right) L \quad (6.1-3)$$

Cálculo de las caídas de presión (para flujo turbulento)

espacio anular  
ecuación 20

interior de la tubería  
ecuación 21

$$\left( \frac{2.691(10^{-6})\rho F_z V^2}{D_H - D_o} \right) L \quad \left( \frac{2.691(10^{-6})\rho F_z V^2}{D_I} \right) L \quad (6.1-4)$$

## 6.2 REMOCIÓN DE RECORTES

### RELACIÓN DE TRANSPORTE DE RECORTES.

Los recortes de roca, avanzan hacia la superficie a un ritmo igual a la diferencia entre la velocidad del fluido y la velocidad de asentamiento de la partícula. La velocidad relativa de la partícula a la superficie es llamada:

#### Velocidad de transporte

$$V_T = \bar{V}_a - \bar{V}_{sl} \quad (6.2-1)$$

La relación de transporte esta definida por la velocidad de transporte dividida entre la velocidad anular media.

$$F_T = \frac{\bar{V}_T}{\bar{V}_a} = 1 - \frac{V_{sl}}{V_a} \quad (6.2-2)$$

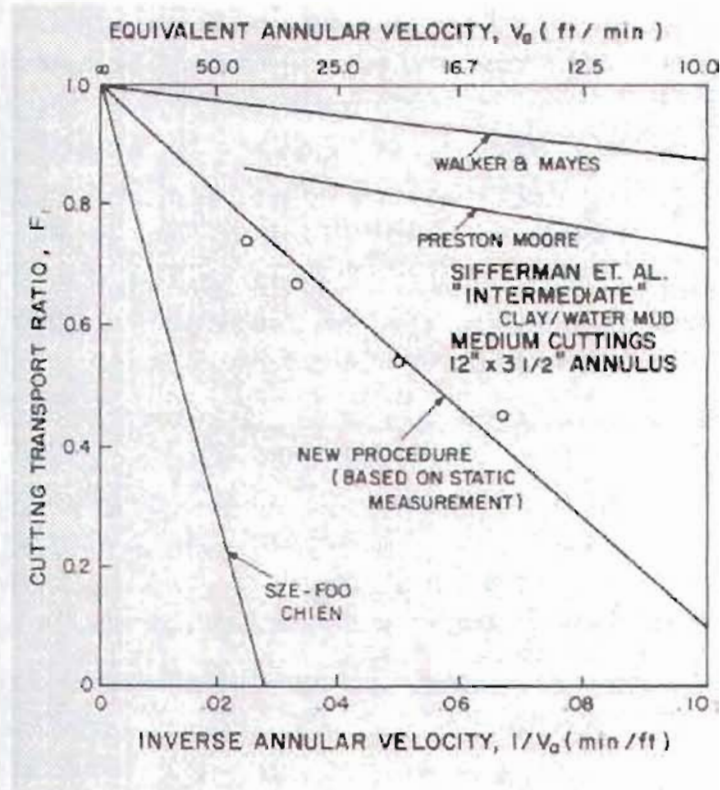
Para que la relación de transporte sea positiva, los recortes deberán ser transportados hacia la superficie. Para una velocidad de resbalamiento de la partícula igual a cero, la velocidad media de los recortes es igual a la velocidad anular media y la relación de transporte será igual a uno.

Cuando la velocidad de resbalamiento de la partícula se incrementa, la relación de transporte decrece y la concentración de recortes en el espacio anular que se dirigen a la superficie, se incrementa la relación de transporte de recortes es una excelente medida de la capacidad de acarreo de un fluido de perforación en particular.

Un reciente trabajo de Sample y Bourgoyne, muestran una gráfica de relación de transporte vs el recíproco de la velocidad anular, para poder crear una gráfica técnica muy conveniente.



GRAFICA 6.2.1 DE SAMPLE Y BOURGOYNE



Puede ser calculada con la ecuación (4.116), donde la velocidad de resbalamiento de la partícula es independiente de la velocidad anular, una línea recta nos muestra el resultado. La pendiente de la línea es numéricamente igual a la velocidad de resbalamiento de la partícula, y la intersección en el eje de las X es igual al recíproco de la velocidad de resbalamiento de la partícula. La intersección con el eje de las Y corresponde a una velocidad anular infinita, deberá ser igual a la relación de transporte de uno. Sample y Bourgoyne crearon para velocidades anulares debajo de 120 pies/min, la velocidad de resbalamiento de la partícula es esencialmente independiente de la velocidad anular.

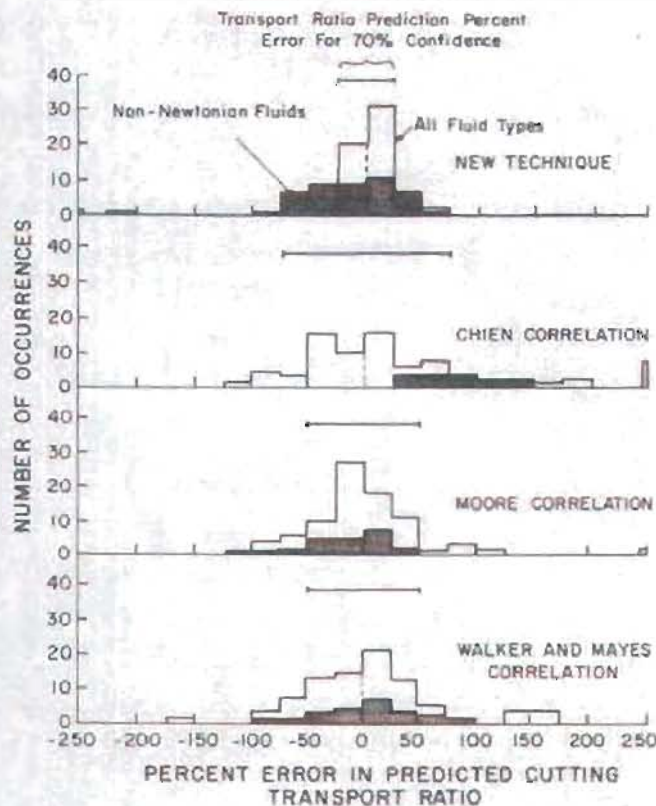
Por consiguiente la determinación experimental de la velocidad de resbalamiento en una columna estática y la línea dibujada desde Y intersecta en 1.0, donde intersecta con el eje X tenemos  $1/V_s$ , es una representación aproximada de la relación de transporte de recortes no podrá ser obtenida. Este procedimiento se aplica usando datos obtenidos en una escala completa de experimentos realizados por Sifferman et al., y los resultados se muestran en la figura anterior.

Las correlaciones de Moore, Chien y Walker and Mayes, también son aplicadas y los resultados son graficados en la figura anterior para compararse. Notese que el método de Sample y Bourgoyne se dedica a mejorar los resultados para este ejemplo.

Note también que los datos experimentales del pozo y los resultados del simulador se obtienen con varias correlaciones dedicadas especialmente a graficar líneas rectas.

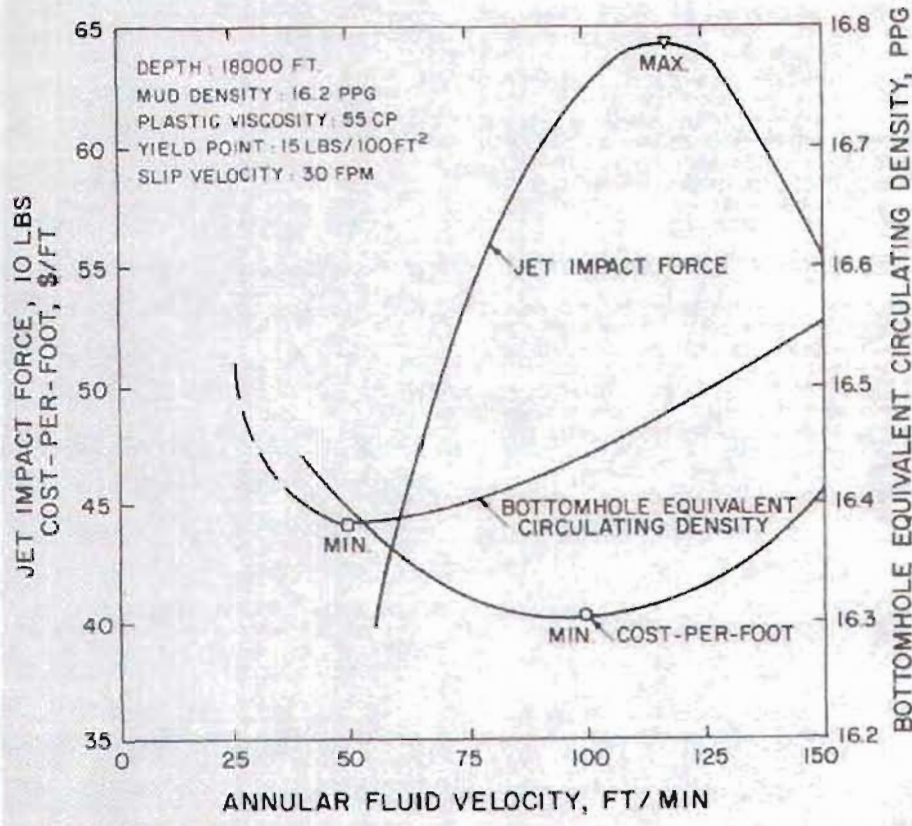
Sample y Bourgoyne recopilaron toda la base de datos en un simulador, conteniendo todos los datos experimentales disponibles de velocidad de resbalamiento de recortes en flujo de fluidos. Los archivos de datos consistentes en mediciones obtenidas para diferentes tipos de fluido (agua, polímero y lodos arcillosos) usando una gran variedad de tamaños y tipos de partículas (esféricas, disco, rectangular, prisma ) y actuales recortes de roca.

Los datos del archivo fueron usados para evaluar la precisión de varios métodos para predecir la relación de transporte de recortes. El histograma de porcentaje de error es mostrado en la siguiente figura:



GRÁFICA 6.2.2

El más preciso deberá usarse para las mediciones experimentales de velocidad de resbalamiento de la partícula en lodos estáticos recientemente removidos de los fluidos de perforación. La correlación empírica más precisa fue la de Moore. El histograma de porcentaje de error de la velocidad de resbalamiento de la partícula, es mostrada en la siguiente figura:



GRÁFICA 6.2.3

Sample y Bourgoyne también desarrollaron un modelo de simulación en la computadora para estimar la relación de transporte de recortes óptima para condiciones de campo. El simulador predice el costo por pie usado en la ecuación (1.16) presentada en la sección 1.10 de capítulo 1. El ritmo de penetración es predicho usando la ecuación 5.28 presentado el sección 5.7 del capítulo 5. La ecuación de ritmo de penetración asume una declinación exponencial en el ritmo de penetración con incrementos en la presión de fondo. También asume que el ritmo de penetración se incrementa proporcionalmente a la fuerza de impacto del Jet levantándola a 0.3 caballos.

Para los valores bajos de relación de transporte de recortes, la concentración de recortes en el espacio anular es alto, causando una alta densidad efectiva del lodo. Esto causa una alta presión de circulación en el fondo del agujero y bajo ritmo de penetración.

La fracción de volumen de los recortes en el lodo puede ser determinado considerando la aportación de los recortes en el gasto,  $q_s$ , de recortes en la barrena y la relación de transporte de recortes,  $F_T$ . Para un ritmo de penetración de la barrena dado,  $(dD/dt)$ , la aportación de los recortes en el gasto es:

$$q_s = A_b \frac{dD}{dt} \quad (6.2-3)$$

Donde  $A_b$  es el área de corte de la barrena. Esta ecuación asume que los recortes no se desintegran a el tamaño de granos individuales. De otra manera, un factor de  $(1-\phi)$  debe ser aplicado, donde  $\phi$  es la porosidad de la roca, la velocidad de transporte de los recortes,  $V_T$ , y del fluido,  $V_a$ , en el espacio anular con área  $A_a$  esta dado por:

$$\bar{V}_T = \frac{q_s}{A_a f_s} \quad (6.2-4) \quad \bar{V}_a = \frac{q_m}{A_a (1 - f_s)} \quad (6.2-5)$$

donde  $f_s$  es la fracción de volumen de recortes en el lodo y  $q_m$  es el ritmo de flujo del lodo.

Desde entonces la relación de transporte,  $F_T$ , esta definida como  $V_T/V_a$ ,

$$F_T = \frac{\frac{q_s}{A_a f_s}}{\frac{q_m}{A_a (1 - f_s)}} \quad (6.2-3)$$

resolviendo esta ecuación para la fracción de volumen dada:

$$f_s = \frac{q_s}{q_s + F_T q_m} \quad (6.2-7)$$

Una vez que la fracción de volumen de recortes es conocida, **la densidad efectiva del lodo en el espacio anular,  $\bar{\rho}$** , podrá ser calculada usando:

$$\bar{\rho} = \rho_m (1 - f_s) + \rho_s f_s \quad (6.2-8)$$

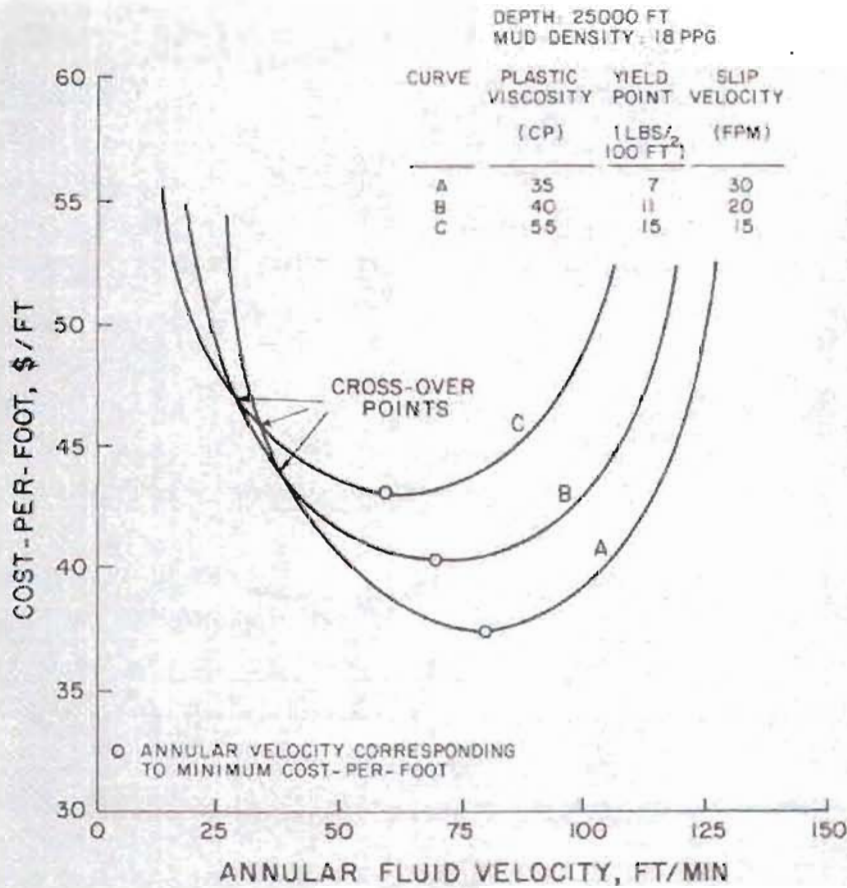
Donde  $\rho_s$  es la densidad promedio de los recortes.

La densidad promedio del lodo de perforación en el espacio anular puede decrecer por el incremento del ritmo de flujo y esto incrementa la relación de transporte. Sin embargo, el ritmo de flujo del lodo es incrementado, alcanza un punto de presión en el fondo del agujero que empieza a incrementarse con el aumento del ritmo de flujo, aumentando excesivamente las caídas de presión por fricción en el espacio anular.

También la fuerza de impacto del Jet disponible en la barrena comienza a decrecer con el incremento del ritmo de flujo ocasionando excesivas caídas de presión por fricción en el interior de la sarta de perforación, por consiguiente existe un ritmo de flujo óptimo con resultados de un costo por pie mínimo teóricamente.

Los resultados típicos obtenidos usando el modelo de computo de Sample y Bourgoyne mostrados en la figura anterior, para un lodo de 16.2 lbm/gal que tiene una viscosidad plástica de 40 cp, un punto de cedencia de 15, con una velocidad de resbamiento de la partícula de 30 pies/min y un diámetro de perforación de 8.5 pulgadas a una profundidad de 18000 pies. Note que el mínimo costo por pie ocurre a una velocidad anular de 100 pies/min. La máxima fuerza de impacto ocurre a una velocidad anular de 120 pies/min y mínima densidad equivalente de circulación ocurre a una velocidad anular de 50 pies/min. Para la mayoría de las condiciones de perforación estudiadas, el criterio de máxima fuerza de impacto tiende a ser ligeramente superior al costo por pie para una verdadera optimización.

La relación de transporte de recortes puede ser aumentado al incrementarse la velocidad anular del fluido, ajustándose las propiedades semejantes del fluido como viscosidad o densidad. Para estos casos un menor costo por pie podrá ser realizado usando lodos de baja viscosidad. Ejemplo de estos resultados calculados para lodos variando su viscosidad son mostrados en la figura siguiente:



GRÁFICA 6.2.4

La evaluación que se realizó a las condiciones reales de campo, fue utilizando los conceptos anteriores, a continuación se muestra un breve resumen de los cálculos realizados para poder cuantificar los valores reales de densidad de lodo de perforación en el espacio anular de los agujeros esbeltos.

Iniciamos los cálculos con la evaluación del **gasto de recortes**:

$$q_s = A_b \frac{dD}{dt}$$

donde:  $A_b$  = área de corte de la barrena ( $pg^2$ )  
 $dD/dt$  = ritmo de penetración (pies/min)

Para realizar la evaluación consideramos las condiciones de campo como por ejemplo:

Densidad de la formación  $\rho_s = 2.6 \text{ gr/cc} = 21.6 \text{ lbm/gal}$   
 Densidad del lodo  $\rho_m = 1.35 \text{ gr/cc} = 11.25 \text{ lbm/gal}$   
 Barrena  $4 \frac{3}{4}''$  con 4 toberas de  $1\frac{1}{32}''$   
 Número aproximado de insertos = 149

**Área de contacto:**

$$\frac{\text{No.insertos}}{S_d} = \frac{149}{\frac{\pi}{4}(4.75)^2} = \frac{149}{(0.7854)(22.56)} = 8.41 \text{ Insertos/pg}^2$$

**Número efectivo de aletas:**

$$\eta_{be} = 1.92 \left( \frac{\text{No.insertos}}{S_d} \right) d_b \sqrt{d_{\text{insertos}} Lp - Lp^2}$$

$$\eta_{be} = 1.92 \left( \frac{8.4 \text{ insertos}}{\text{pg}^2} \right) (4.75) \sqrt{0.23(0.01) - (0.01)^2}$$

$$\eta_{be} = 76.6992 * 0.0467 = 3.5975$$

**Penetración efectiva:**

$$L_{pe} = 0.67(L_p)$$

$$L_{pe} = 0.67(0.01)$$

$$L_{pe} = 0.0067 \text{ no}$$

Las RPM<sub>motor</sub> = 380 y las RPM<sub>rotaria</sub> = 60 ; **total de RPM = 440:**

El ritmo de penetración a 440 rpm como velocidad de rotaria.

$$R = L_{pe} \eta_{be} N = \frac{0.0067}{12} (3.5975)(440 * 60)$$

$$R = L_{pe} \eta_{be} N = 53.03 \text{ pies/hora}$$

Y el área de corte de la barrena esta dado por:

$$A_b = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi}{4} (4.75)^2 = 17.72$$

$$A_b = 17.72 \text{ pg}^2 \left( \frac{1 \text{ pie}^2}{12^2 \text{ pg}^2} \right) = 17.72 \text{ pg}^2 \left( \frac{1 \text{ pie}^2}{144 \text{ pg}^2} \right) = 0.123 \text{ pies}^2$$

$$A_b = 0.123 \text{ pies}^2$$

Por lo tanto el gasto de los recortes que aporta la formación durante la etapa de perforación es:

$$q_s = 0.123 \text{ pies}^2 (53.03 \text{ pies / hora}) = 6.52 \text{ pies}^3 / \text{hora}$$

$$q_s = 6.52 \text{ pies}^3 / \text{hora}$$



Asumiendo un patrón de flujo de transición, la velocidad de resbalamiento de la partícula esta dado por:

$$V_{sl} = \frac{2.90d_s(\rho_s - \rho_f)^{0.667}}{\rho_f^{0.333} * \mu_a^{0.333}}$$

El indice de consistencia e indice de comportamiento son:

$$n = 0.726559$$

$$K = 1.5958$$

$$K = 159 \text{ eq cp}$$

La viscosidad aparente se determinó de la siguiente manera:

$$\mu_a = \frac{K}{144} \left( \frac{d_2 - d_1}{\bar{V}_a} \right)^{1-n} \left( \frac{2 + \frac{1}{n}}{0.0208} \right)^n$$

$$\mu_a = \frac{159}{144} \left( \frac{4.75 - 2.875}{\bar{3}} \right)^{1-0.72} \left( \frac{2 + \frac{1}{0.72}}{0.0208} \right)^{0.72}$$

$$\mu_a = 1.104 * (0.8767) * (39.14)$$

$$\mu_a = 37.88 \text{ cp}$$

Como la velocidad de resbalamiento de la partícula está dada por:

$$V_{sl} = \frac{2.90d_s(\rho_s - \rho_f)^{0.667}}{\rho_f^{0.333} * \mu_a^{0.333}}$$

$$V_{sl} = \frac{2.90 * (0.25)(21.6 - 11.83)^{0.667}}{11.83^{0.333} * 37.88^{0.333}}$$

$$V_{sl} = \frac{3.31587}{(2.2767)(3.35)} = 0.4342$$

$$V_{sl} = 0.4342 \text{ pies / seg}$$

El número de Reynolds para la partícula está dado por:

$$N_{Re} = \frac{928(\rho_f)(\overline{V_{sl}})(d_s)}{\mu_a}$$

$$N_{Re} = \frac{928(11.83)(0.4342)(0.25)}{37.88}$$

$$N_{Re} = 31.46$$

Como el número de Reynolds está entre 3 y 300 la relación de transporte nos queda:

$$F_T = \frac{3.0 - 0.4342}{3.0} = 0.855 \quad \circ \quad 85.5\%$$

$$V_a = 180 \frac{\text{pies}}{\text{min}} \left( \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \right) = 3 \frac{\text{pies}}{\text{seg}}$$

$$q_m = 104 \left( \frac{\text{gal}}{\text{min}} \right) * \left( \frac{1 \text{ pie}^3}{7.481 \text{ gal}} \right) * \left( \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hora}} \right) = 834 \frac{\text{pies}^3}{\text{hora}}$$

$$q_m = 834 \frac{\text{pies}^3}{\text{hora}}$$

La fracción de volumen de recortes está dada por la siguiente ecuación:

$$f_s = \frac{q_s}{q_s + F_T(q_m)}$$

$$f_s = \frac{6.52 \frac{\text{pies}^3}{\text{hora}}}{6.52 \frac{\text{pie}^3}{\text{hora}} + (0.855) \left( 834 \frac{\text{pie}^3}{\text{hora}} \right)}$$

$$f_s = 9.0607151 * 10^{-3}$$

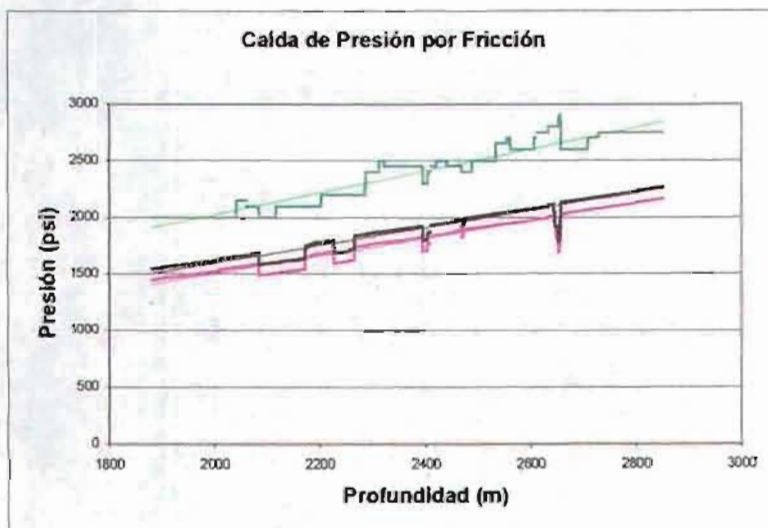
La densidad efectiva del espacio anular, en la perforación de agujeros esbeltos.

$$\bar{\rho} = 11.83 \frac{\text{lbm}}{\text{gal}} (1 - 0.009060715129) + 21.6 \frac{\text{lbm}}{\text{gal}} (0.009060715129)$$

$$\bar{\rho} = 11.72 + 0.1957 = 11.9157 \frac{\text{lbm}}{\text{gal}}$$

$$\bar{\rho} = 1.43 \frac{\text{gr}}{\text{cc}}$$

Concluyendo: El factor correspondiente a la remoción de recortes no es representativo en las caídas de presión por fricción en el espacio anular, ya que la densidad efectiva en el espacio anular aumentó 0.01 de gr/cc, que representado en caída de presión sólo reflejará entre 10 y 15 lbm/pg<sup>2</sup>.



GRÁFICA 6.2.5

## 6.3 EFECTO COUETTE

### Rotación de la sarta

La mayoría de los modelos hidráulicos están basados en diámetros de agujero convencional y no consideran el efecto de rotación de la sarta con claros anulares pequeños. La rotación de la sarta tiene un efecto sobre el perfil de velocidad cuando el claro anular es reducido. Este efecto es generalmente ignorado en la perforación convencional, pero puede ser significativo en la perforación de diámetro reducido. En claros anulares pequeños, la rotación de la sarta afecta la trayectoria del lodo y los recortes. Por un efecto viscoso llamado efecto de "Couette", la rotación de la sarta obliga al lodo a estar en rotación. Debido a este efecto, la trayectoria resultante del lodo y los recortes perforados son helicoidales.

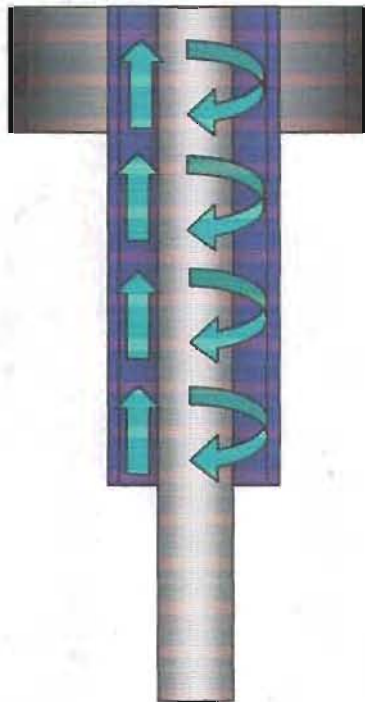


FIGURA 6.3.1

Este efecto de resorte causa en el perfil de velocidad un incremento en la longitud efectiva durante la trayectoria del lodo de retorno así como el viaje de los recortes.

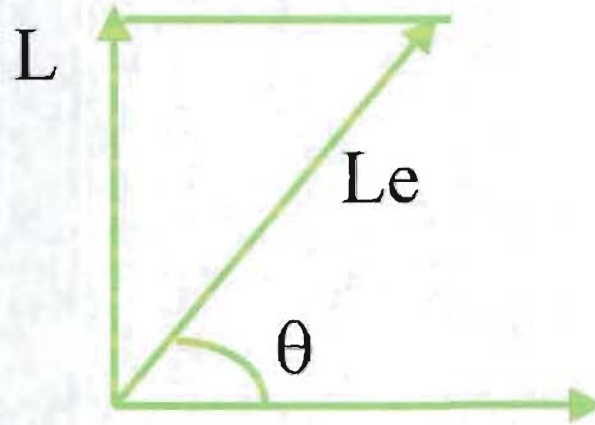


FIGURA 6.3.2

Esto causa dos problemas potenciales:

- 1) La longitud de retorno en la trayectoria del lodo incrementa la caída de presión anular
- 2) La fuerza de transporte de los recortes se reduce debido a que el fluido de perforación se mueve directamente contrario al efecto de la gravedad.

El desarrollo del efecto de "Couette" depende de:

- ✓ Las propiedades reológicas del lodo.
- ✓ Régimen de flujo.
- ✓ Gasto.
- ✓ Velocidad de rotación de la sarta.
- ✓ Diámetro de la sarta.
- ✓ Claro anular.

Si el régimen de flujo anular es turbulento, la rotación de la sarta no afecta al área total anular y el efecto de "Couette" es pequeño. Mas aún, en lodos viscosos es más probable que se presente flujo laminar y es mas importante el efecto de "Couette".

La determinación del limite entre el flujo laminar y el flujo turbulento es dificultoso debido a que el flujo axial y tangencial no son independientes.

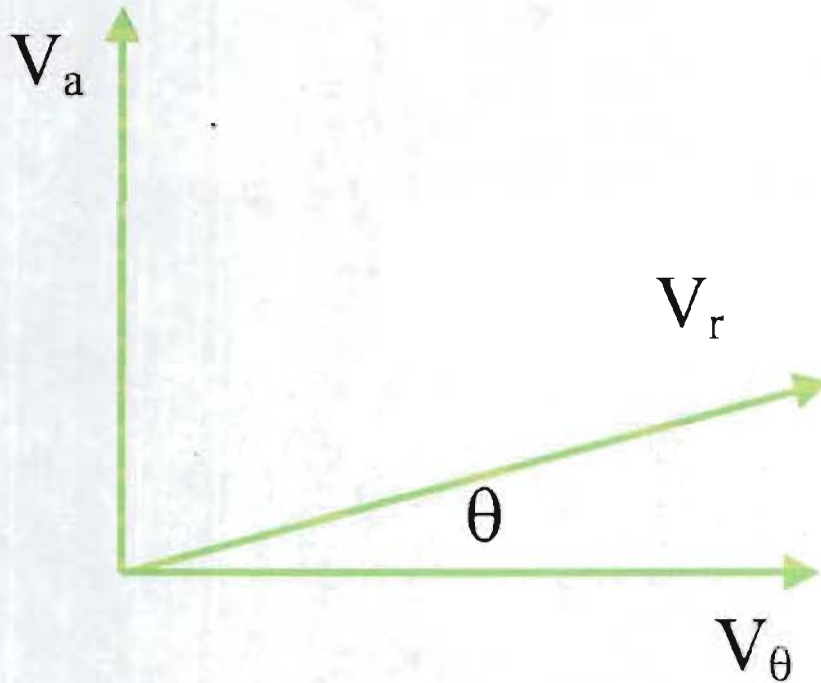


FIGURA 6.3.3

De la prueba de campo, determinamos las RPM que se manejaron durante la perforación del pozo culebra No. 281.

$$RPM = 140(\text{motor}) + 60(\text{rotaria}) = 200 \quad (6.3-1)$$

También conocemos el perímetro que recorre la partícula en su movimiento.

$$PERÍMETRO = (\pi)(D) = (3.1416) * (2.875) = 9.032 \text{ pg} \quad (6.3-2)$$

Sabemos que una vuelta corresponde a 9.032 pg y en un minuto da 200 vueltas, podemos determinar la velocidad tangencial.

$$V_{\theta} = 200 * 9.032 = 1806.4 \frac{\text{pulg}}{\text{min}} \quad (6.3-3)$$

Convirtiendo a unidades de campo tenemos:

$$V_{\theta} = 1806.4 \frac{\text{pulg}}{\text{min}} \left( \frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulg}} \right) = 150.5333 \frac{\text{pies}}{\text{min}}$$

$$V_{\theta} = 150.53 \frac{\text{pies}}{\text{min}}$$

La velocidad axial determinada durante la perforación del agujero reducido fue de:

$$V_a = 180 \frac{\text{pies}}{\text{min}} \quad (6.3-4)$$

Con estos datos podemos determinar una velocidad resultante, que más adelante nos permita calcular la longitud efectiva que recorre el lodo y el recorte de perforación.

$$V_r = \sqrt{V_{\theta}^2 + V_a^2} \quad (6.3-5)$$

$$V_r = \sqrt{150.533^2 + 180^2}$$

El valor de la velocidad resultante es:

$$V_r = 235 \frac{\text{pies}}{\text{min}}$$

Ya con estos valores, procedemos al cálculo de la longitud efectiva que recorre el lodo de perforación y los recortes.

$$\text{sen}\theta = \frac{V_a}{V_r} = \frac{180}{235} = 0.766 \quad (6.3-6)$$

$$\theta = 50 \text{grados}$$

Finalmente conocemos una aproximación de la longitud efectiva por cada pie de profundidad.

$$Le = \frac{L}{\text{sen}\theta} = \frac{1 \text{pie}}{\text{sen}(50.00)} = 1.3054 \quad (6.3-7)$$

$$Le = 1.30(\text{pies})$$



Profundidad	Convencional	Couette	Caida de presión	Caida de presión	Caida de presión
			total por	por remoción	efecto couette +
			excéntrica	de recortes	excéntrica +
			rem. recortes		
1881	1446.86	347.87	91.72	2.93	1889.38
1882	1447.48	348.06	91.72	2.94	1890.18
1883	1448.09	348.24	91.72	2.94	1890.99
1884	1448.71	348.43	91.72	2.94	1891.79
1885	1449.32	348.61	91.72	2.94	1892.59
1886	1449.94	348.80	91.72	2.94	1893.39
1887	1450.56	348.98	91.72	2.94	1894.20
1888	1451.17	349.17	91.72	2.94	1895.00
1889	1451.79	349.35	91.72	2.94	1895.80
1890	1452.41	349.54	91.72	2.95	1896.61
1891	1453.02	349.72	91.72	2.95	1897.41
1892	1453.64	349.90	91.72	2.95	1898.21
1893	1454.26	350.09	91.72	2.95	1899.01
1894	1454.87	350.27	91.72	2.95	1899.82
1895	1455.49	350.46	91.72	2.95	1900.62
1896	1456.11	350.64	91.72	2.95	1901.42
1897	1456.72	350.83	91.72	2.95	1902.22
1898	1457.34	351.01	91.72	2.95	1903.03
1899	1457.96	351.20	91.72	2.96	1903.83
1900	1458.57	351.38	91.72	2.96	1904.63
1901	1459.19	351.57	91.72	2.96	1905.43
1902	1459.80	351.75	91.72	2.96	1906.24
1903	1460.42	351.94	91.72	2.96	1907.04
1904	1464.00	352.83	91.72	2.96	1911.50
1905	1464.62	353.01	91.72	2.96	1912.31
1906	1465.24	353.20	91.72	2.96	1913.11
1907	1465.85	353.38	91.72	2.96	1913.92
1908	1466.47	353.57	91.72	2.96	1914.72
1909	1467.09	353.76	91.72	2.96	1915.53
1910	1467.71	353.94	91.72	2.97	1916.33

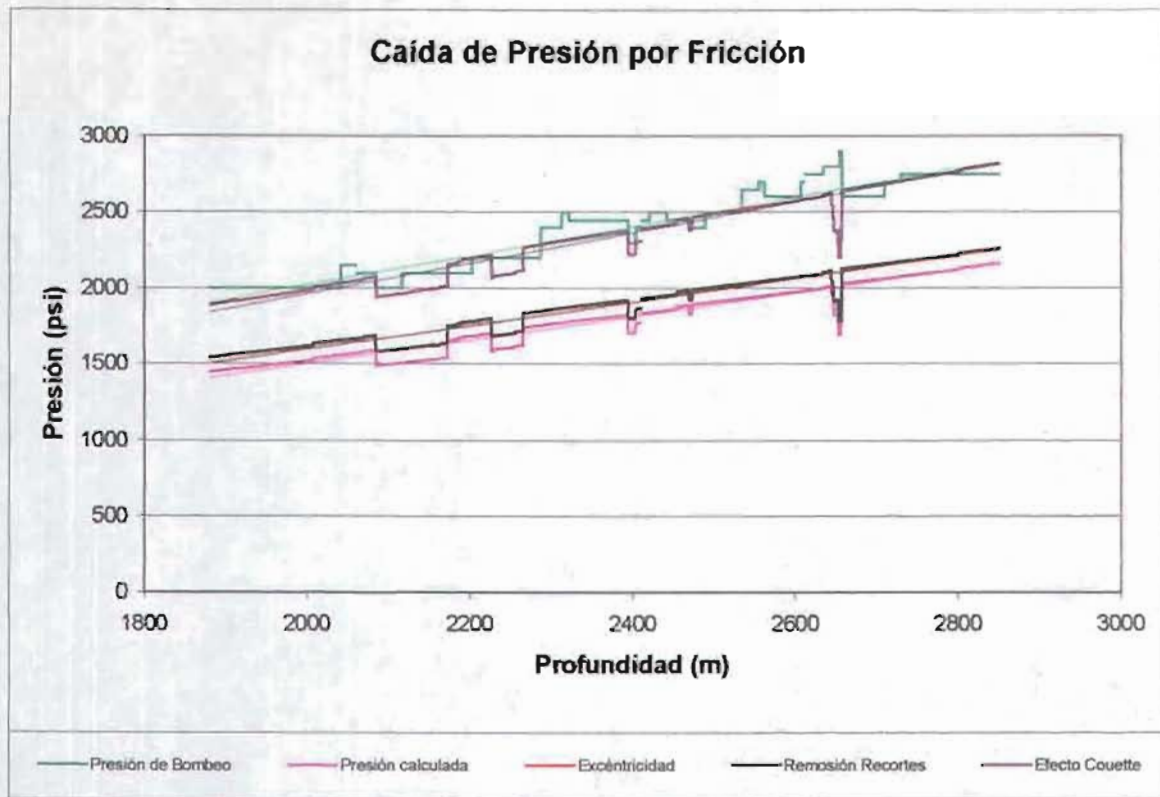
TABLA 6.3.1

Se muestra la siguiente tabla para poder apreciar el porcentaje de caídas de presión por cada uno de los efectos.

Las caídas de presión por fricción debidas al efecto couette alcanzan un porcentaje promedio del 18.4 %.

Y las correspondientes a la excentricidad de la tubería son de aproximadamente 4.8 %.

Mientras que para la remoción de los recortes apenas alcanza un 0.2 %.



GRÁFICA 6.3.1

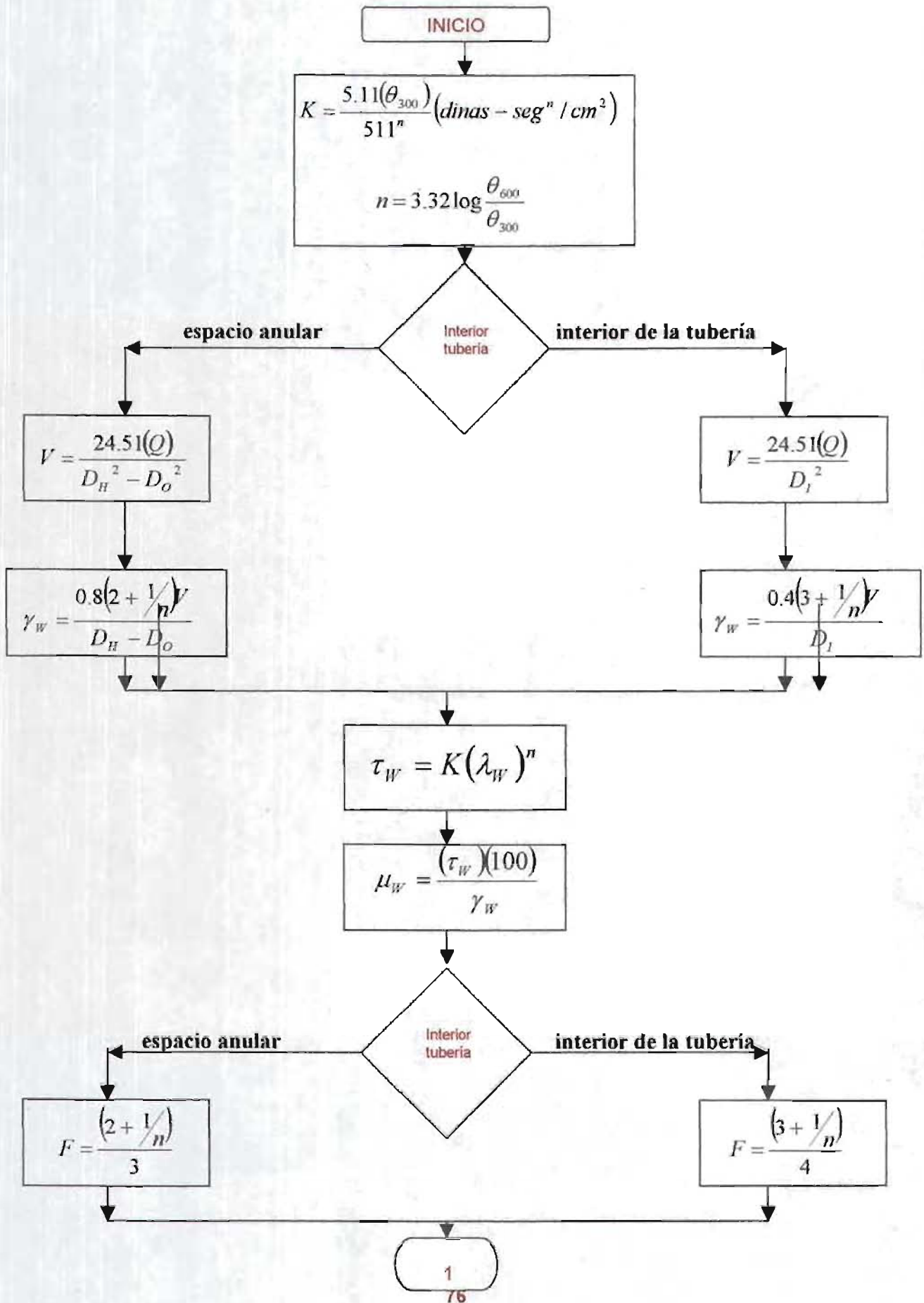
En la gráfica anterior, observamos la línea verde, que son los valores reales de presión de bombeo obtenidos directamente en la prueba de campo, pozo culebra No. 281 perteneciente a la Cuenca de Burgos, Región Norte.

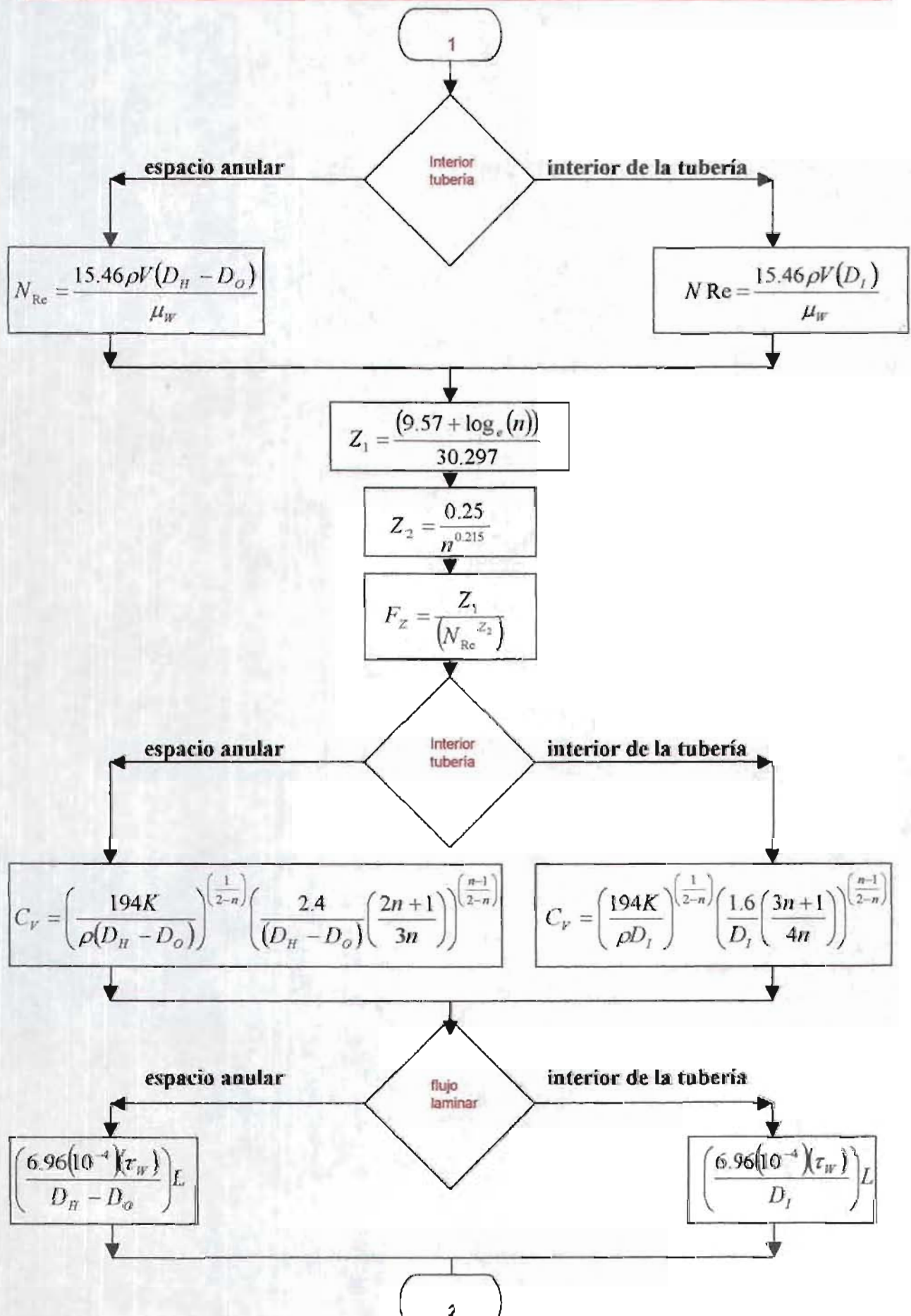
La línea de color magenta representa los valores de caídas de presión por fricción, calculados por el método de Ley de Potencias (convencional).

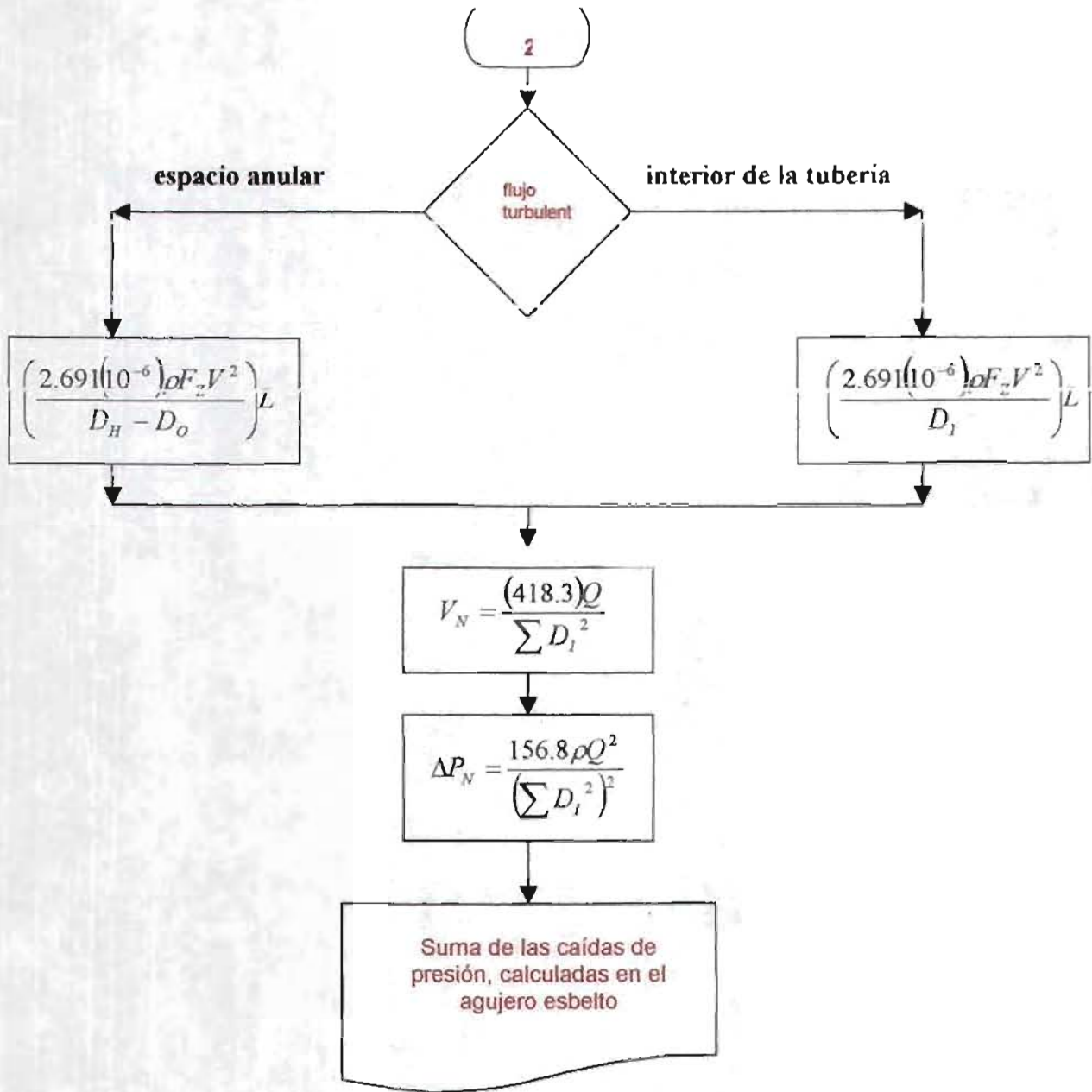
La línea roja representa las caídas de presión por fricción por el efecto de excentricidad de la tubería en la perforación del pozo, y aproximadamente representa el 4.8 %.

La línea negra prácticamente se encuentra sobre la línea roja, y pertenece a las caídas de presión por fricción debidas a la remoción de recortes, pero son despreciables ya que solo se incrementa de 3 a 5 psi, lo que representa solo el 0.2 % del total.

Y finalmente las caídas de presión por fricción representadas por la línea café, son las equivalentes al efecto Couette, que en este trabajo corresponden al 18.4 %, siendo este efecto, el que determina la diferencia existente, en las caídas de presión por fricción, para un agujero convencional contra un agujero esbelto.



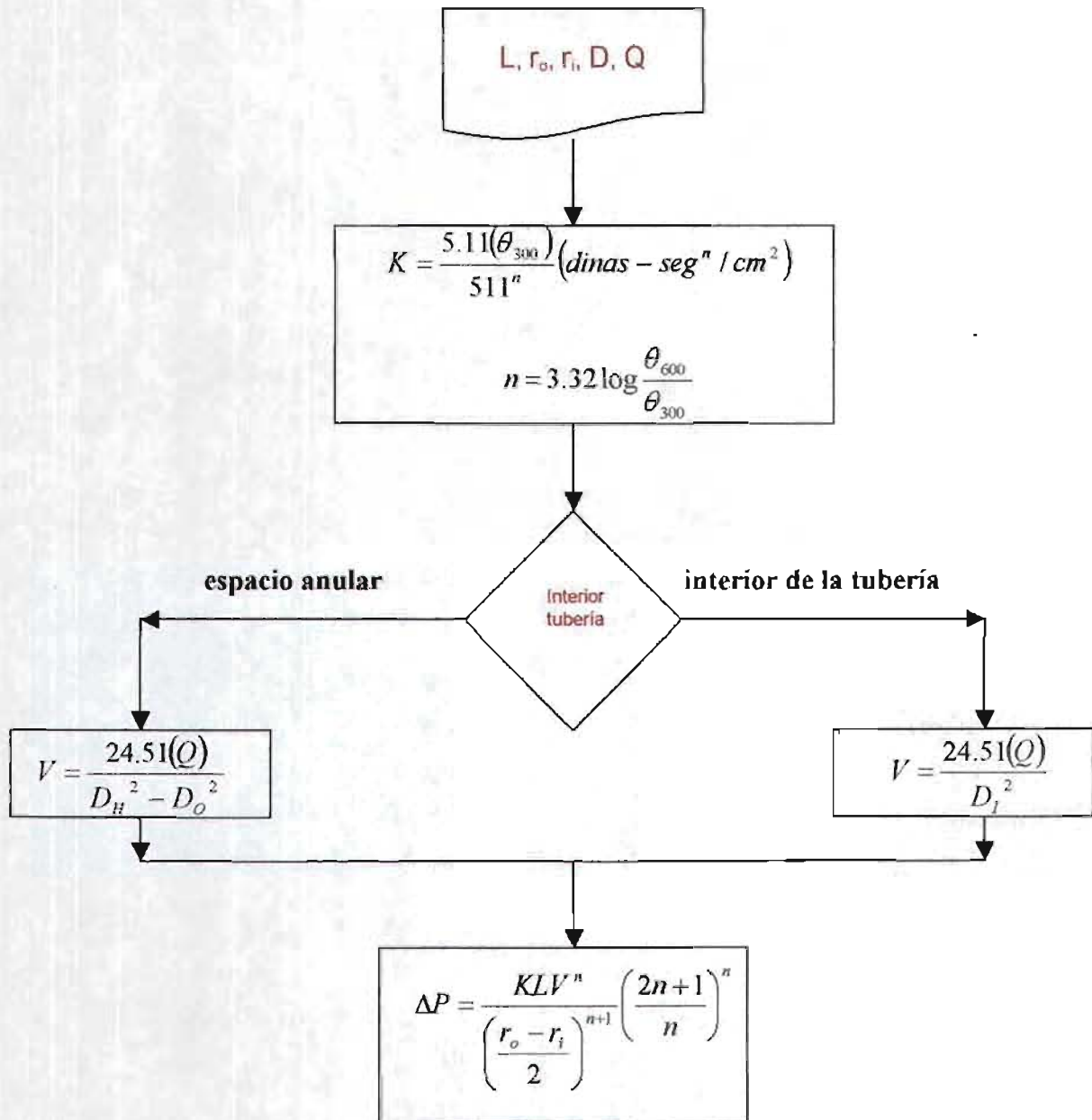




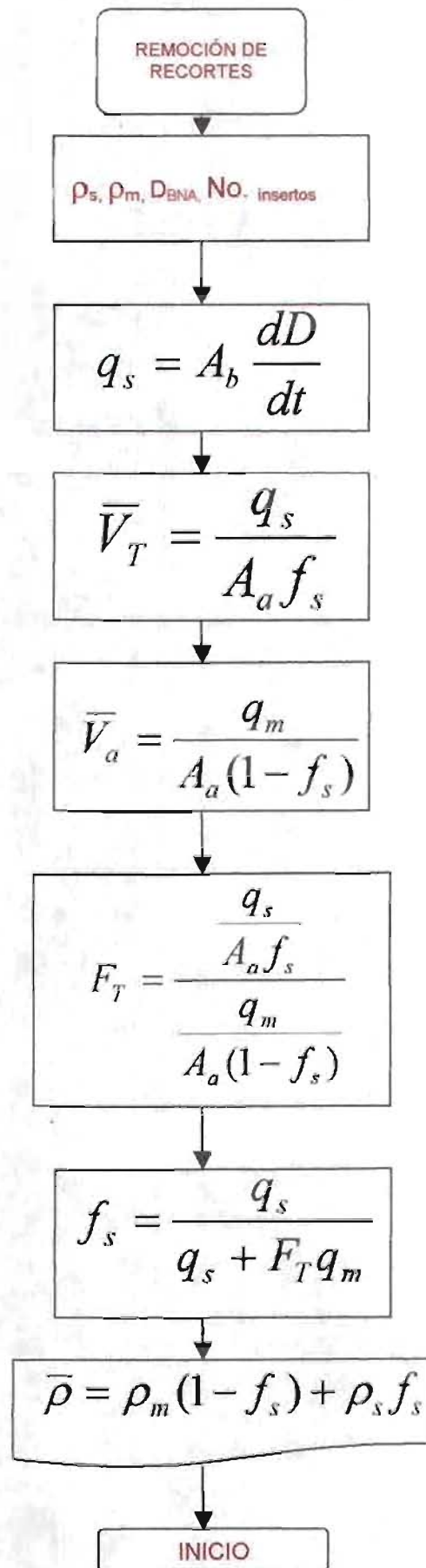
Hasta aquí se calculan las caídas de presión por fricción, para el espacio anular, interior de la sarta, en la barrena, y las conexiones superficiales de control, pero como en este caso, estamos hablando del agujero esbelto de 1881 a 2850 m, en el pozo culebra No. 281, deberemos considerar los tres efectos.

A continuación mostraremos el procedimiento, y las modificaciones que sufre el cálculo por el modelo de Ley de Potencias, al considerar los tres efectos:

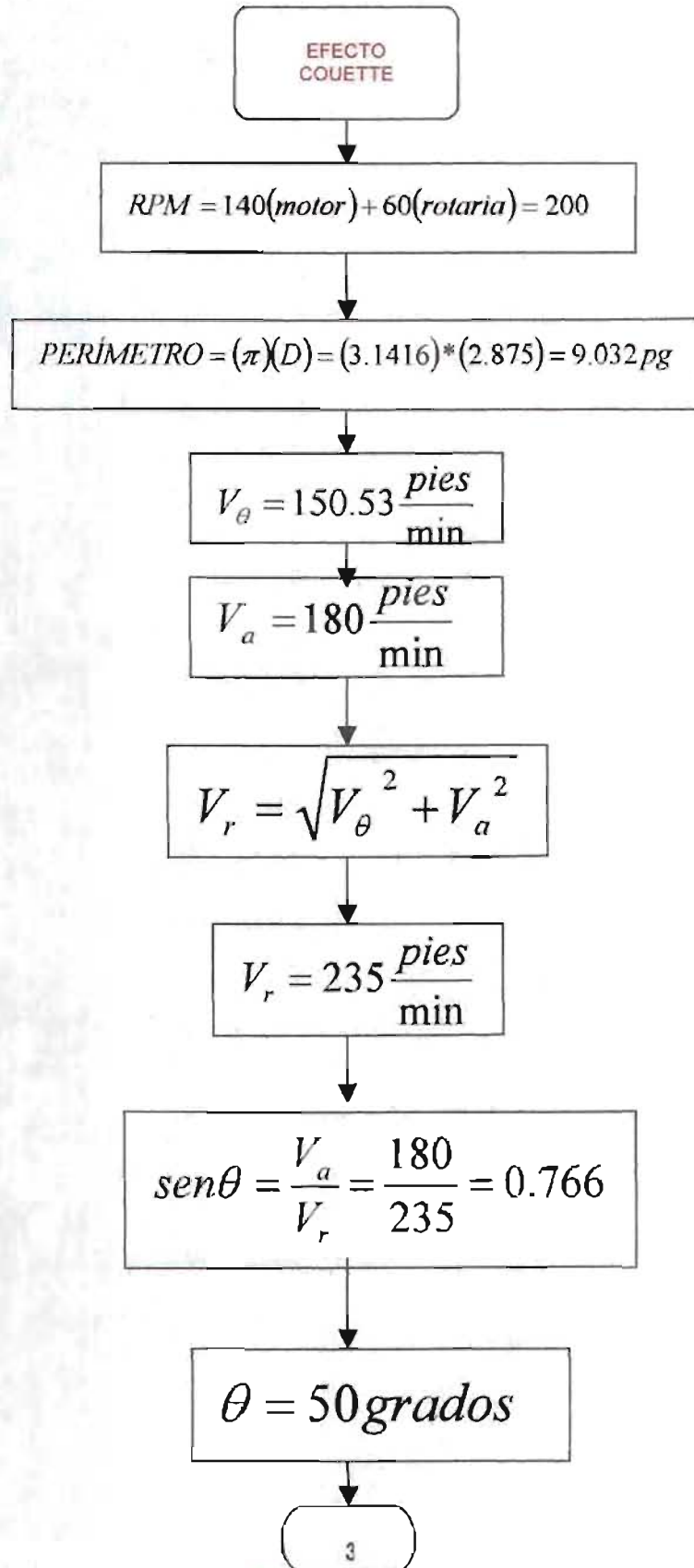
Primeramente, para considerar el efecto de **excentricidad**, deberemos apoyarnos en el artículo de Aniekan W. Iyoho, donde muestra como evaluar los valores de velocidad, para espacios anulares excéntricos.



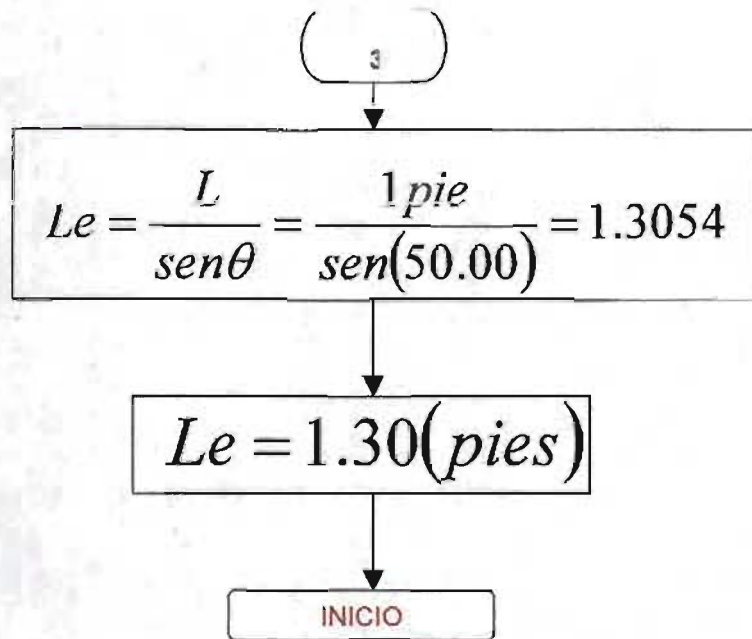
Para considerar el efecto por remoción de recortes, primero debemos evaluar el gasto de recortes, para luego calcular la velocidad de resbalamiento de la partícula y así poder obtener la relación de transporte, ya con estos datos, se obtiene; la fracción de volumen de los recortes y finalmente obtenemos la densidad efectiva del espacio anular, dato con el cual calcularemos las caídas de presión por fricción.



Finalmente la cuantificación del efecto couette, se realiza evaluando la longitud equivalente que recorre la partícula, sacando la velocidad resultante, apoyada en las velocidades tangencial y axial.



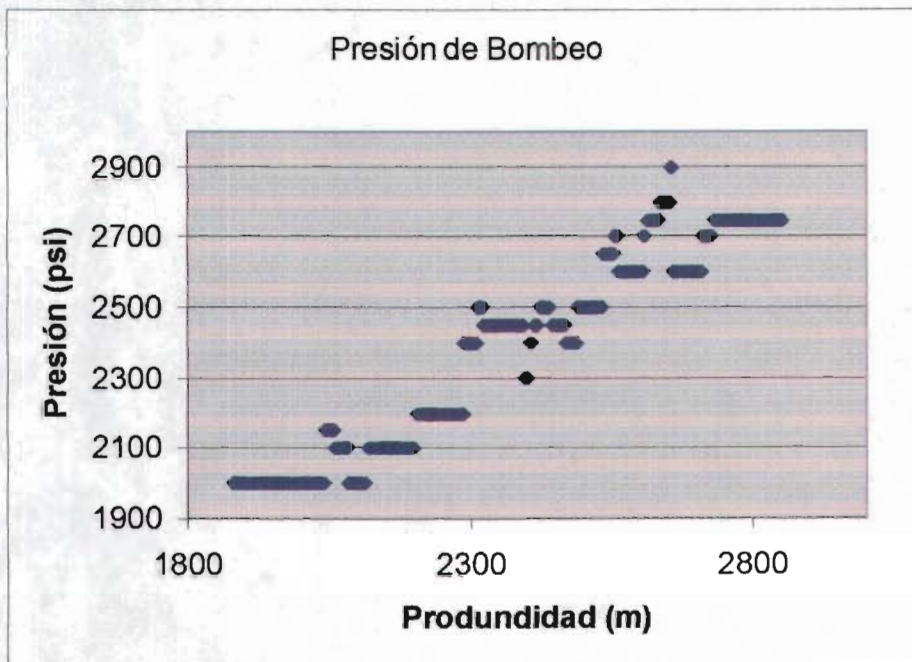




Ya con la última evaluación, del efecto couette, tenemos el total de los tres efectos, que suman el 25 % aproximadamente de caída de presión por fricción adicional.

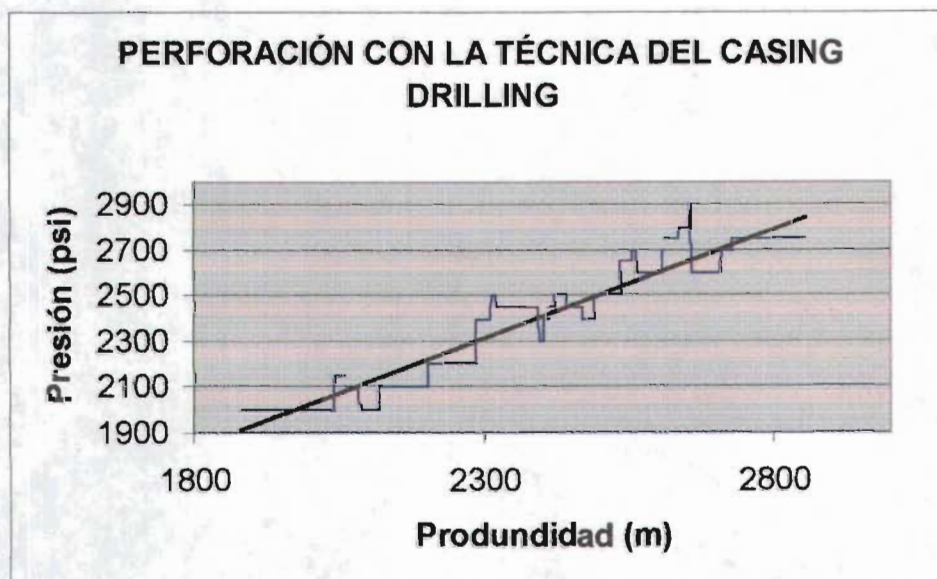
## CAPITULO 7

7.- ANÁLISIS GRÁFICO COMPARANDO LAS CAÍDAS DE PRESIÓN POR FRICCIÓN (REALES DE LA PRUEBA DE CAMPO CONTRA CALCULADAS POR EL MODELO REOLOGICO), ESPECIFICAMENTE EN EL AGUJERO REDUCIDO.

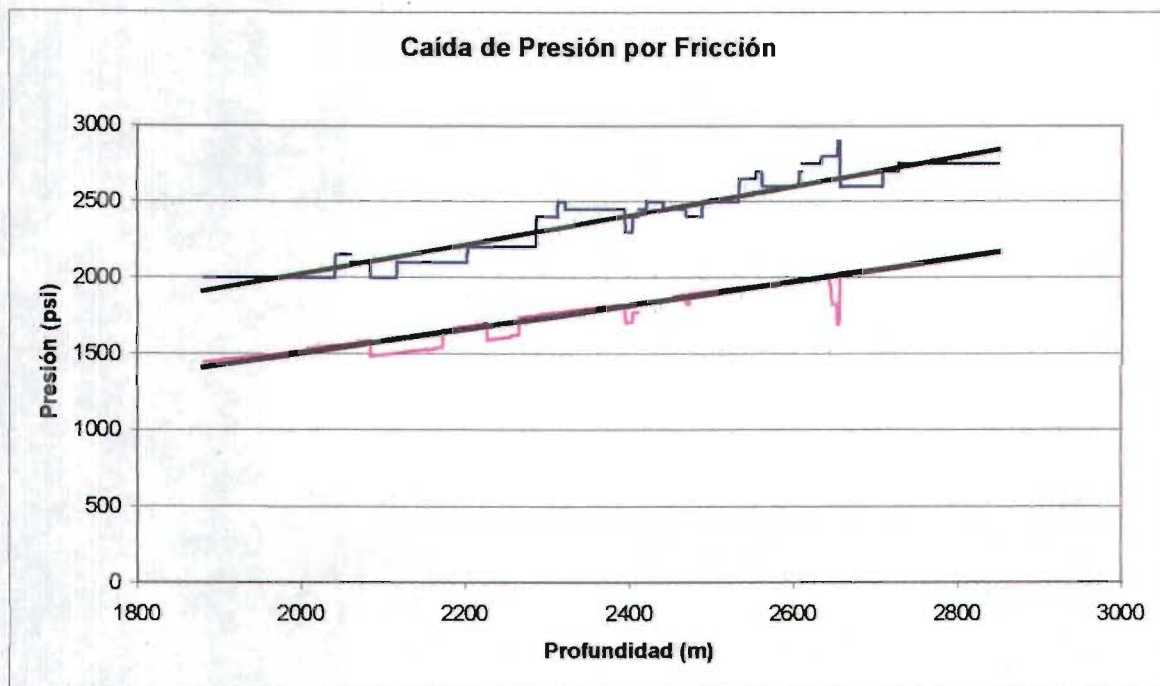


**Figura 7.1** En la gráfica superior, se muestran los valores reales del incremento de la presión, conforme se profundiza, durante la perforación del pozo, específicamente en el agujero reducido.

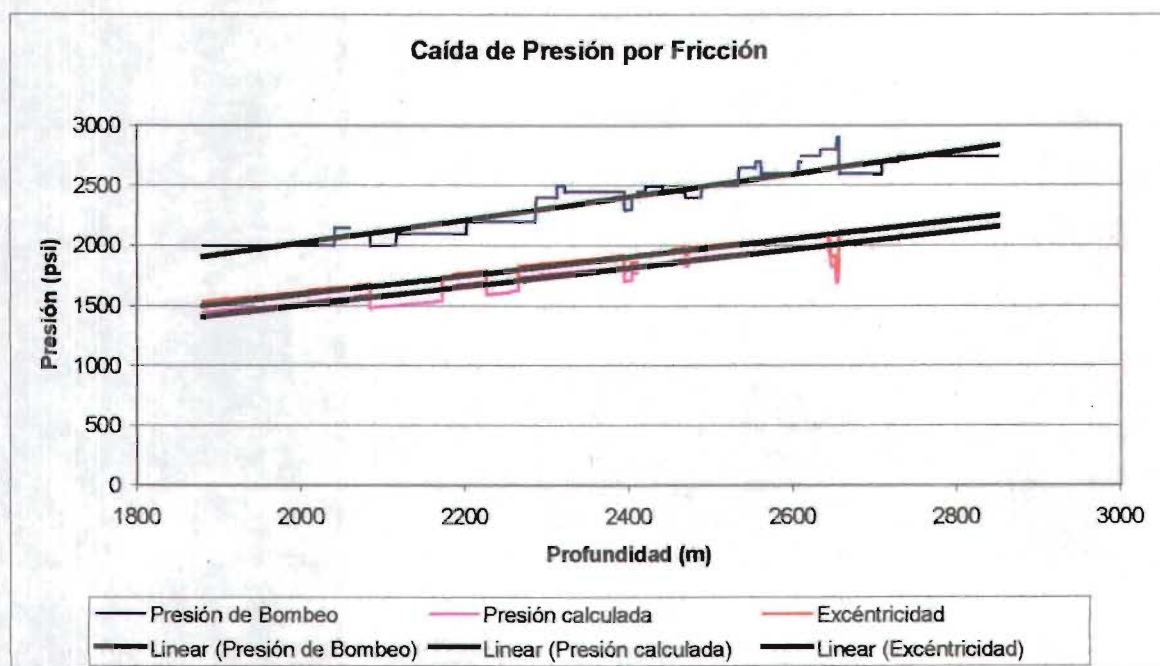
**Figura 7.2** Y en la inferior, se trazó la tendencia para que se aprecie mejor, y permita compararse contra los valores calculados.



**Figura 7.3** En la siguiente gráfica se comparan las caídas de presión por fricción reales de la prueba de campo contra las calculadas por el modelo reológico.

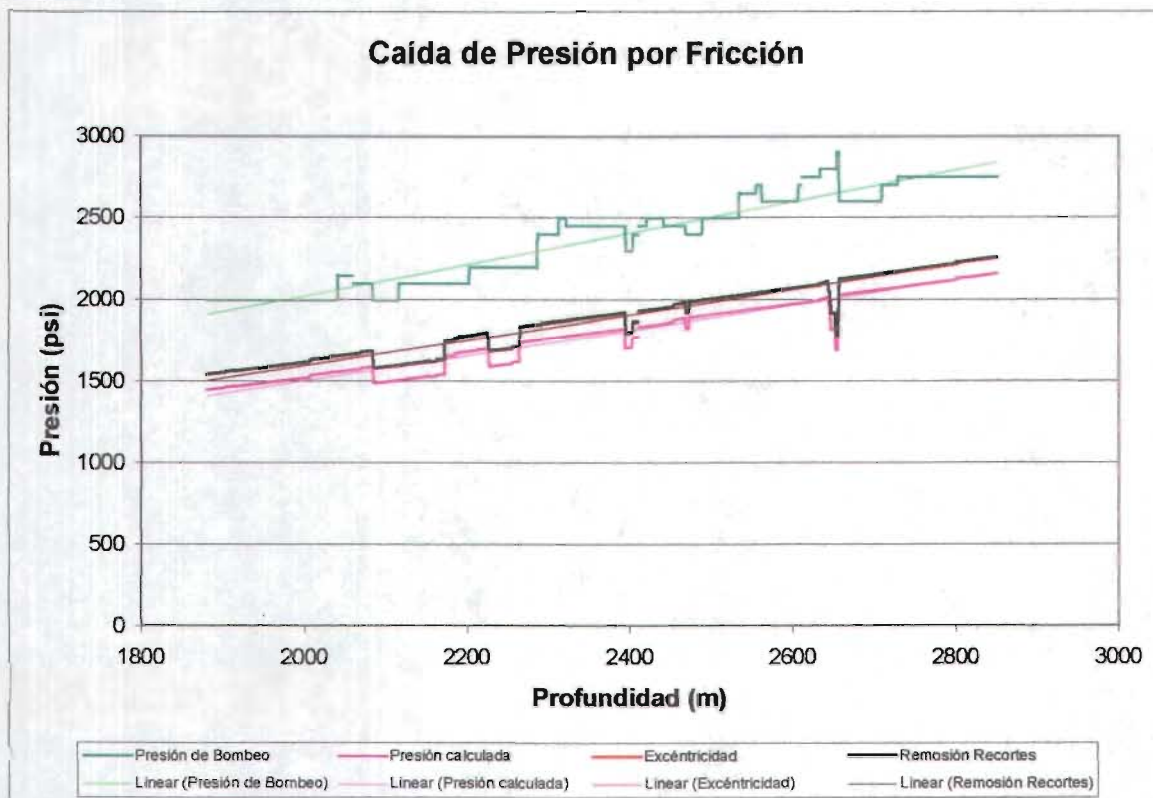


**Figura 7.4** En la gráfica siguiente se traza la caída de presión por fricción, debido al factor de excentricidad, donde notamos que si afecta considerablemente en las caídas de presión, como vemos en la gráfica, casi corresponde a una cuarta parte de la diferencia que existe entre los valores reales y los calculados.



Otro de los factores que tomamos en cuenta es la Remoción de recortes, al realizar el cálculo y graficar el trazo correspondiente a este efecto tenemos:

Al calcular la caída de presión por fricción debido a la remoción de recortes, esto mediante un procedimiento que primeramente nos exige evaluar la nueva densidad del lodo de perforación, con la cuál podremos recalcular y determinar el nuevo valor correspondiente a la caída de presión por fricción en el espacio anular, pero al graficar la caída de presión debido a la remoción de los recortes se pudo apreciar que no es significativa, ya que solamente se incrementa de 10 a 15 lb/pg<sup>2</sup>.



**Figura 7.5** Representación de la caída de presión por fricción correspondiente al efecto de Excentricidad y Remoción de recortes.

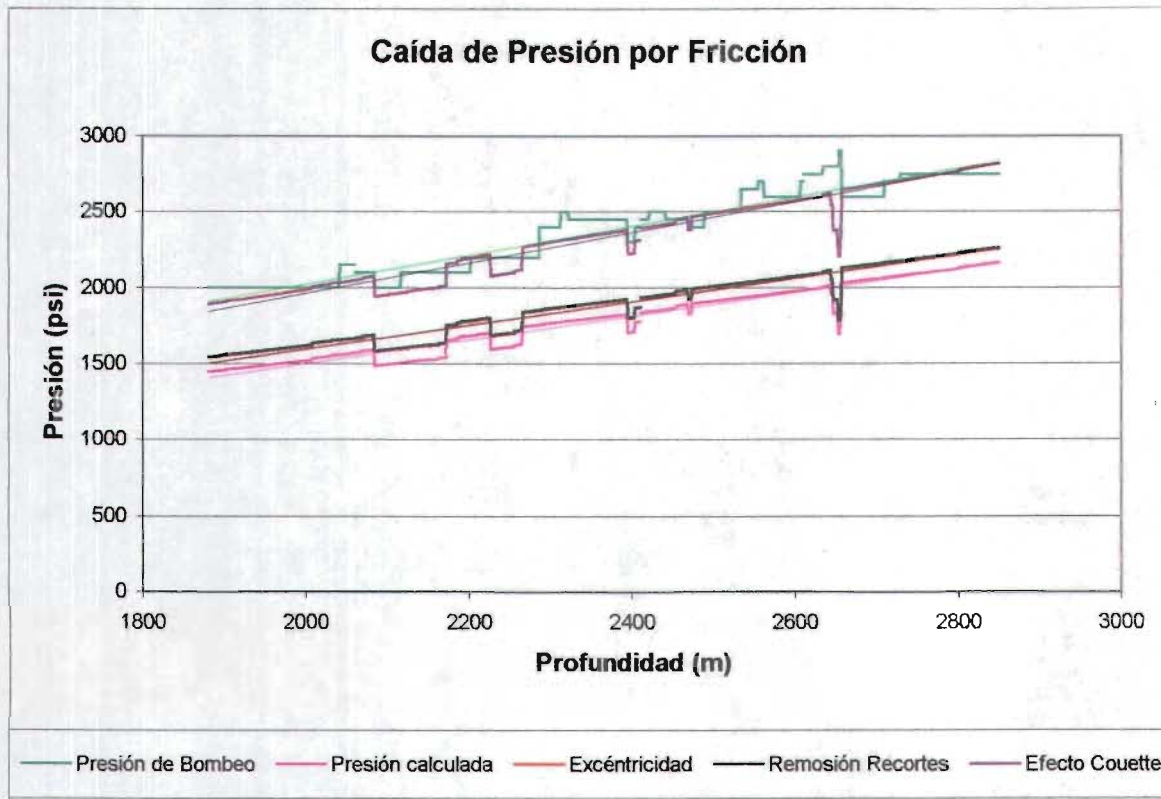


Figura 7.6

En la gráfica anterior, observamos la línea verde, que son los valores reales de presión de bombeo obtenidos directamente en la prueba de campo, pozo culebra No. 281 perteneciente a la Cuenca de Burgos, Región Norte.

La línea de color magenta representa los valores de caídas de presión por fricción, calculados por el método de Ley de Potencias (convencional).

La línea roja representa las caídas de presión por fricción por el efecto de excentricidad de la tubería en la perforación del pozo, y aproximadamente representa el 4.8 %.

La línea negra prácticamente se encuentra sobre la línea roja, y pertenece a las caídas de presión por fricción debidas a la remoción de recortes, pero son despreciables ya que solo se incrementa de 3 a 5 psi, lo que representa solo el 0.2 % del total.

Y finalmente las caídas de presión por fricción representadas por la línea café, son las equivalentes al efecto Couette, que en este trabajo corresponden al 18.4 %, siendo este efecto, el que determina la diferencia existente, en las caídas de presión por fricción, para un agujero convencional contra un agujero esbelto.

## CAPITULO 8

### 8.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### CONCLUSIONES.

**8.1** Concluimos que existen algunos efectos (Excentricidad, Remoción de recortes, Efecto couette) que deberán ser considerados cuando óptimos por perforar agujeros esbeltos, ya que tienen un valor significativo, mientras que en la perforación convencional son prácticamente despreciables.

**8.2** La cuantificación de los efectos que se presentan en agujeros esbeltos queda de la siguiente manera:  $\Delta P$  por excentricidad es de 5 %,  $\Delta P$  por efecto couette es de 20 % y  $\Delta P$  por remoción de recortes prácticamente es despreciable.

**8.3** De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, concluimos que en una sarta convencional del 70 % al 90 % de pérdida de presión en el sistema de circulación se presenta dentro de la sarta de perforación y a través de la barrena, mientras que en la perforación con T. R. de 5 ½" tendremos del 70 % al 90 % de pérdida de presión, en el sistema de circulación presente en el Espacio Anular.

**8.4** Por otra parte, se deberán manejar gastos reducidos durante la perforación de agujeros esbeltos, para lograr tener un régimen de flujo laminar y minimizar las caídas de presión por fricción en el Espacio Anular.

**8.5** Debido a la alta sensibilidad del espacio anular en cuanto al gasto, pequeños aumentos en el gasto, pueden causar mayores cambios en la densidad equivalente de circulación (DEC), dejando problemas serios en el pozo.

**8.6** Es recomendable el manejo de valores bajos de Viscosidad Plástica y Punto de Cedencia, siempre que nos permitan una limpieza eficiente, para poder tener propiedades reológicas mínimas del lodo, lo cuál redundará en menores caídas de presión en el Espacio Anular.

## RECOMENDACIONES.

**8.7** En situaciones críticas, donde la densidad equivalente de circulación alcanzada con ésta geometría sea superior al gradiente de fractura de la formación, a la profundidad de la zapata, se recurrirá al uso de las barrenas bi-céntricas para aumentar el diámetro del agujero y así disminuir la caída de presión por fricción en el espacio anular.

**8.8** Grandes variaciones en la DEC, pueden causar problemas tales como: 1) manifestaciones y reventones, 2) cierre del pozo, 3) pérdida de circulación y 4) daño excesivo de la formación.

**8.9** El uso de productos químicos, como los reductores de fricción en el lodo de perforación, mantienen al fluido en régimen de flujo laminar, logrando así disminuir significativamente las caídas de presión.

**8.10** La descentralización de la sarta de perforación causa altos valores de caída de presión en el espacio anular, acentuándose en la perforación de agujeros esbeltos.

**8.11** Altas velocidades en el espacio anular mejoran la remoción de los recortes.

**8.12** Los claros pequeños alrededor de las uniones incrementan la caída de presión y pueden causar erosión del agujero.

**8.13** Altas velocidades de rotación de la sarta (300 a 800 rpm ) pueden causar que los sólidos perforados y los materiales pesados se acumulen en forma de placas debido a las altas fuerzas centrífugas, por esto se incrementan las caídas de presión.

**8.14** Las limitaciones en el ritmo de flujo del motor de fondo pueden conducir a problemas de limpieza en el agujero.

## OBSERVACIONES ADICIONALES.

**8.15** La técnica de perforar con tubería de revestimiento, reduce tiempos de perforación y tuberías utilizadas en la perforación convencional, consecuentemente es una alternativa viable para abatir el costo de los pozos durante su etapa de perforación.

**8.16** De acuerdo al programa de perforación para el campo Arcabuz-Culebra, es posible aplicar esta técnica para obtener mejores resultados y mostrar sus beneficios, ya que su ámbito de aplicación incluye campos con características similares a las de Arcabuz-Culebra.

**8.17** La incorporación de tecnología de vanguardia en nuestra industria nos permitirá ser mas competitivos en los mercados nacionales e internacionales.

**8.18** La técnica de perforar con tubería de revestimiento, ya ha sido aplicada con éxito en la Cuenca de Burgos, con este trabajo se persigue promover y difundir la técnica, sin perder de vista que el perforar con tubería de revestimiento, es una aplicación extraordinaria que se puede utilizar en:

- ✓ Campos de desarrollo en explotación intermedia o avanzada. Donde se requiere aumentar la rentabilidad de los proyectos de inversión (activos).
- ✓ En pozos verticales someros a medianos con una profundidad promedio entre 1500 y 3000 metros.
- ✓ Que requieran solo dos o tres etapas para su perforación.
- ✓ Que sus necesidades de producción se manejen a través de diámetros reducidos.
- ✓ Que las conexiones a utilizar para este tipo de tuberías deberán tener valores a la torsión y arrastre, igual o mayor que la correspondiente tubería de perforación utilizada normalmente para hacer pozos similares.
- ✓ Los diámetros recomendables para utilizar esta técnica son 4 ½", 5", 5 ½", 6", 6 5/8" y 7".
- ✓ Los campos deben ser de desarrollo, por lo tanto las formaciones a perforar estarán perfectamente identificadas y serán factibles de perforar con esta técnica.



## **OBSERVACIONES ADICIONALES.**

**8.19** Se requiere del compromiso y trabajo conjunto de los involucrados para asegurar el éxito de la operación y así obtener el mayor beneficio en la aplicación de nuevas técnicas.

**8.20** Es recomendable antes de iniciar la actividad operativa tener una relación de los accesorios, herramientas y servicios que serán utilizados durante la perforación del pozo, para evitar los tiempos de espera, a fin de mejorar la procura y logística al pozo.

**8.21** Se deberá proporcionar anticipadamente los programas detallados de perforación a todo el personal involucrado, para garantizar el buen desempeño y optimización de la perforación con cualquier nueva técnica.

**8.22** Se deberá conocer el gradiente de formación y fractura para mantener el gradiente del lodo de perforación muy cercano al de formación durante la perforación, a fin de evitar el riesgo de pegadura por presión diferencial y también de esta manera incrementar el ritmo de penetración.

**8.23** En la perforación se deberán manejar los parámetros de operación dentro de un rango razonable, que permita utilizar eficientemente las tuberías y conexiones programadas en el diseño.

**8.24** La técnica de perforar con tubería de revestimiento, es una alternativa más, para poder optimizar la rentabilidad de los activos; pero no deberá utilizarse indiscriminadamente para cualquier pozo y campo, sin haber hecho una evaluación extensa de casos candidatos a este tipo de tecnología.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- SLIM – HOLE WELL TECHNOLOGY TRAINING MANUAL.  
 JULIO / 1993.  
 COPIA CONFIDENCIAL PARA EL USO DE LA SPE (ANIVERSARIO OCT/92).  
 CONSULTORES: Delwiche, R. A. BD. Stratabit.  
 Lejeune, M. W. D. Consultor.  
 Mawet, P. F. B. N. Consultor.
- 2.- APPLIED DRILLING ENGINEERING SPE (1984).  
 Martín E. Chenevert, Adam T. Bourgoyne Jr., Keith K. Millheim, F. S. Young Jr.
- 3.- MANUAL DE OPERACIÓN PARA BARRENAS TRICÓNICAS EN LA  
 PERFORACIÓN DE POZOS PETROLIFEROS.  
 Subdirección de Producción primaria / Gerencia de Perforación (1986).
- 4.- DRILL STEM DESIGN AND INSPECTION.  
 First Edition, December, 1992.  
 T. H. Hill Associates, Inc.
- 5.- API RP 7G, "Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating Limits".  
 Fourteenth Edition, American Petroleum Institute, August 1, 1990.
- 6.- CONTROL DE VARIABLES Y OPTIMIZACIÓN DE LA PERFORACIÓN.  
 M. en I. Juan Antonio Morales Díaz de Vivar.  
 Instituto Mexicano del Petróleo / Universidad Nacional Autónoma de México.
- 7.- REOLOGÍA DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN Y REPARACIÓN DE  
 POZOS.  
 M. en C. Juan Gilberto León Loya.  
 Catedrático: Ciencias de la tierra – Instituto Politécnico Nacional.
- 8.- OPTIMIZACIÓN DE LA HIDRÁULICA DE PERFORACIÓN.  
 M. en C. Juan Gilberto León Loya.  
 Catedrático: Ciencias de la tierra – Instituto Politécnico Nacional.
- 9.- RELACIÓN ENTRE LA PROFUNDIDAD Y LA VELOCIDAD DE  
 PERFORACIÓN.  
 M. en C. Juan Gilberto León Loya.  
 Catedrático: Ciencias de la tierra – Instituto Politécnico Nacional.
- 10.- PETROLEUM WELL CONSTRUCTION.  
 Michael J. Economides, Larry T. Watters, Shari Dunn-Norman 1988

- 11.- THEORY AND APPLICATION OF DRILLING FLUID HYDRAULICS.  
Alun Whittaker. 1985
- 12.- TECNOLOGÍA DE PERFORACIÓN (FLUIDOS DE PERFORACIÓN).  
Rafael Martínez García. Enero 1989
- 13.- DRILLING MUD AND CEMENT SLURRY RHEOLOGY MANUAL.  
Madeleine Martin  
(IFP) Institut Francais du Pétrole 1982
- 14.- HIDRÁULICA DE FLUIDOS DE EMULSIÓN INVERSA EN PERFORACIÓN ROTATORIA.  
Emilio de la Torre Ramos. 1988  
(IFP) Institut Francais du Pétrole 1982
- 15.- TECHNICAL MANUAL FOR DRILLING, COMPLETION AND WORKOVER FLUIDS.  
(IDF)International Drilling Fluids
- 16.- AN ACCURATE SLOT-FLOW MODEL FOR NON-NEWTONIAN FLUID FLOW THROUGH ECCENTRIC ANNULI.  
Aniekan W. Iyoho, SPE, Crest Engineering Inc.  
Jamal J. Azar, SPE, U. Of Tulsa.
- 17.- ROTARY DRILLING WITH CASING A FIELD PROVEN METHOD OF REDUCING WELLBORE CONSTRUCTION COST.  
Greg Galloway Weatherford International  
Copyright 2003 World Oil Casing Drilling Technical Conference.
- 18.- RETRIEVABLE TOOLS PROVIDE FLEXIBILITY FOR CASING DRILLING.  
Robert M. Tessari, Tesco Corp., Tommy Warren, Tesco Corp. and Bruce Houtchens, Tesco Corp.  
Copyright 2003 World Oil Casing Drilling Technical Conference.
- 19.- NEW RIG DESING ENHANCES CASING DRILLING OPERATIONS IN LOBO TREND  
Kyle Fontenot, Joe Highnote, Robert Strickler, Conoco Phillips,Evert Beierback, Per Angman, Tesco Corp.  
Copyright 2003 World Oil Casing Drilling Technical Conference.
- 20.- NEW RIG DESING ENHANCES CASING DRILLING OPERATIONS IN LOBO TREND  
Kyle Fontenot, Joe Highnote, Robert Strickler, Conoco Phillips,Evert Beierback, Per Angman, Tesco Corp.  
Copyright 2003 World Oil Casing Drilling Technical Conference.

- 21.- NEW DEVELOPMENTS IN THE TECHNOLOGY OF DRILLING WITH CASING: UTILIZING A DISPLACEABLE DRILLSHOE TOOL.  
Dave McKay, Weatherford, Greg Galloway, Weatherford and Ken Dalrymple, Weatherford.  
Copyright 2003 World Oil Casing Drilling Technical Conference.
- 22.- LINER AND CASING DRILLING- CASE HISTORIES AND TECHNOLOGY  
Ray Vincent and Troy Miller, Baker Oil Tools, Imran Butt, Baker Hughes INTEQ And Allen Sinor, Hughes Christensen.  
Copyright 2003 World Oil Casing Drilling Technical Conference.
- 23.- DRILLING WITH CASING ADVANCES TO FLOATING DRILLING UNIT WITH SURFACE BOP EMPLOYED.  
Edi Sutriano – Santos, Ralph Adams – Santos, Greg Galloway – Weatherford, Ken Dalrymple - Weatherford.  
Copyright 2003 World Oil Casing Drilling Technical Conference.
- 24.- DEVELOPMENT AND TESTING OF AN ECONOMICAL CASING CONNECTION FOR USE IN DRILLING OPERATIONS.  
Ed Evans, Grant Prideco; Richard Griffin, Grant Prideco; Wei Tang, Grant Prideco; Tommy Warren, Tesco Corporation.  
Copyright 2003 World Oil Casing Drilling Technical Conference.
- 25.- CASING DRILLING  
A Revolutionary Approach To Reducing Well Costs.  
Cia. TESCO Corporation.