

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERIA DE PETROLEO**



**DISEÑO Y EVALUACION DEL PROCESO DE
CEMENTACION DE POZOS UTILIZANDO EL
SIMULADOR “CEMCADE”**

TESIS:

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE PETROLEO**

YANIL MARIA DEL CASTILLO MARAVI

PROMOCION 1994 – 0

LIMA – PERU – 2000

Dedico esta tesis a mi madre, por su apoyo y dedicación en mi formación personal y profesional; así como a mi hija Alessandra, por inspirarme el deseo de superarme día a día.

DISEÑO Y EVALUACION DEL PROCESO DE CEMENTACION DE POZOS UTILIZANDO EL SIMULADOR "CEMCADE"

1. INTRODUCCION

2. CRITERIOS NECESARIOS PREVIOS AL PROCESO DE SIMULACION

2.1. REMOCION DEL LODO

2.1.1. IMPORTANCIA

2.1.2. FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DE SU DESPLAZAMIENTO

2.1.3. TIPOS DE FLUJO

2.1.3.1. FLUJO TURBULENTO

2.1.3.2. FLUJO LAMINAR EFECTIVO

- CRITERIO DE DIFERENCIAL DE DENSIDADES
- CRITERIO DE DIFERENCIAL DE PRESION POR FRICCION
- CRITERIO DE MINIMO GRADIENTE DE PRESION
- CRITERIO DE DIFERENCIAL DE VELOCIDADES

2.1.3.3. FLUJO TAPON

2.1.3.4. DIFERENCIAS PRINCIPALES ENTRE FLUJO LAMINAR EFECTIVO Y FLUJO TAPON

2.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCION DE LAVADORES, ESPACIADORES Y MEZCLAS DE CEMENTO

2.2.1. GRADIENTES PORALES Y DE FRACTURA

2.2.2. INTERACCIONES CEMENTO - FORMACION

2.2.2.1. PERDIDA DE CIRCULACION

2.2.2.2. MIGRACION DE GAS

2.3. GUIA PARA LA SELECCION DE LAVADORES, ESPACIADORES Y MEZCLAS DE CEMENTO

2.3.1. DISEÑO DE LAVADORES, ESPACIADORES

2.3.2. DISEÑO DE MEZCLAS DE CEMENTO- ADITIVOS

2.3.2.1. DISEÑO DE LAS PROPIEDADES DE UNA MEZCLA DE CEMENTO

- DENSIDAD
- REOLOGIA
- PERDIDA DE FILTRADO
- TIEMPO DE BOMBEABILIDAD
- GELIFICACION
- AGUA LIBRE
- SEDIMENTACION
- COMPATIBILIDAD DE FLUIDOS
- ESFUERZO COMPRESIVO

2.4. CONSIDERACIONES ESPECIALES PARA POZOS ALTAMENTE DESVIADOS

3. SIMULACION

- 3.1. PROCESO DE DISEÑO
- 3.2. DESCRIPCION DEL POZO
- 3.3. SECUENCIA DE LLENADO DEL ANULAR
- 3.4. DISEÑO DE LA CENTRALIZACION
 - 3.4.1. LIMITES DE "STANDOFF" REQUERIDOS
 - 3.4.2. DISTRIBUCION DE FUERZAS EN LA TUBERIA DURANTE UN PROCESO DE CEMENTACION
 - 3.4.3. TIPOS DE CENTRALIZADORES
 - 3.4.4. MODELO MATEMATICO PARA EL CALCULO DEL "STANDOFF"
- 3.5. DISEÑO DE LA BAJADA DE LA TUBERIA REVESTIDORA
- 3.6. PROCESO DE BOMBEO DE FLUIDOS - EFECTO DE TUBO EN "U"
 - 3.6.1. DESCRIPCION TEORICA Y MEDIDAS PARA CONTRARRESTARLO
 - 3.6.2. INFLUENCIA EN EL PROCESO DE REMOSION DEL LODO

POZOS ALTAMENTE DESVIADOS - NOROESTE

4. DISEÑO DEL TRABAJO DE CEMENTACION

- 4.1. SELECCION DE LOS FLUIDOS(LAVADORES Y/O ESPACIADORES Y MEZCLAS DE CEMENTO)
- 4.2. SECUENCIA DE LLENADO DEL ANULAR
- 4.3. DISEÑO DE LA CENTRALIZACION Y DE LA BAJADA DE LA TUBERIA REVESTIDORA
- 4.4. DISEÑO DE LOS CAUDALES DE FLUJO(CAUDAL CRITICO Y/O CAUDAL MINIMO Y MAXIMO)
- 4.5. SIMULACION DEL PROCESO DE BOMBEO DE FLUIDOS
 - EVALUACION DEL TIEMPO DE CONTACTO Y/O VOLUMEN EFECTIVO
- 4.6. PROGRAMA FINAL DE CEMENTACION Y DE ACONDICIONAMIENTO DEL LODO

5. EVALUACION

- 5.1. EVALUACION COMPARATIVA DEL TRABAJO DE CEMENTACION REAL VS. EL DISEÑO
 - TIEMPO DE CONTACTO Y/O VOLUMEN EFECTIVO
- 5.2. EVALUACION DE LA CALIDAD DE LA CEMENTACION- REGISTRO CBL/VDL
- 5.3. ANALISIS DE COSTOS

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

A PRUEBAS DE LABORATORIO - POZOS ALTAMENTE DESVIADOS - NOROESTE

DISEÑO Y EVALUACION DEL PROCESO DE CEMENTACION DE POZOS UTILIZANDO EL SIMULADOR "CEMCADE"

1. INTRODUCCION

Durante más de 50 años se han desarrollado muchos procedimientos para los trabajos de cementación primaria, desde simples hojas de calculo hasta complejos simuladores computarizados que permiten integrar los datos disponibles y predecir problemas, permitiendo un ajuste fácil y rápido para optimizar los diseños.

Con la finalidad de alcanzar los objetivos de la cementación primaria que son: proporcionar aislamiento hidráulico de las formaciones (no exista movimiento de fluidos a través del anillo de cemento entre las diferentes zonas permeables) proteger y soportar la tubería; se requiere que el lodo sea completamente removido y reemplazado por la mezcla de cemento en todo el anular, y una vez que esta sea colocada, alcance y mantenga ciertas propiedades mecánicas como: adherencia y alta resistencia al esfuerzo compresivo durante largos periodos de tiempo.

Reconociendo las consecuencias de una mala cementación primaria: el pozo puede nunca alcanzar su real capacidad productiva, que los trabajos de resane requeridos pueden causar un daño irreparable a la formación productiva, la posibilidad de pérdida de reservas, bajos caudales de producción, y/o producción diferida, y finalmente la falta de capacidad para confinar los trabajos de estimulación y/o trabajos de recuperación secundaria futuros.

Esta Tesis muestra una metodología nueva dirigida a optimizar el diseño de un trabajo de cementación mediante el uso del simulador CEMCADE. En base a los parámetros del pozo (diámetros de las tuberías, geometría del pozo, trayectoria, propiedades del lodo, presión poral y de fractura), se optimizan los parámetros del trabajo (densidades de los fluidos, reologías, volúmenes, programa de centralización y caudales de bombeo) mediante el uso de algoritmos que simulan diferentes fenómenos físicos relacionados con:

- Fuerzas involucradas cuando se esta metiendo o sacando la tubería del pozo
- Centralización de la tubería en el pozo
- Efecto de tubo en "U"
- Desplazamiento fluido/fluido

Este programa también permite chequear que la operación de cementación pueda ser realizada de manera segura, basado en:

- Chequeos de la integridad de la tubería (presiones de colapso y ruptura)
- Control de presiones en el pozo, tanto en estado estático como dinámico (presiones porales y de fractura)
- Evaluación de las fuerzas de empuje sobre la tubería debido a las fuerzas de flotación

Finalmente este Programa permite comparar los datos registrados en tiempo real durante el trabajo de bombeo con los datos provenientes del diseño para evaluar la calidad de la ejecución del trabajo de cementación. De esta forma se trata de presentar en una forma lógica y fácilmente entendible aspectos importantes que nos puedan servir de guía para un entendimiento básico de los problemas y soluciones involucrados en un trabajo de cementación primaria.

2. CRITERIOS NECESARIOS PREVIOS AL PROCESO DE SIMULACION

2.1 REMOCION DEL LODO

2.1.1 IMPORTANCIA

Un desplazamiento incompleto del lodo puede dejar un canal continuo a través de las zonas de interés, permitiendo una comunicación interzonal. Además la contaminación del Cemento con el Lodo no desplazado, con los Lavadores y/o Espaciadores durante su proceso de colocación puede ocasionar: bolsones de lodo gelificado, cemento de baja resistencia a la compresión, cemento de alta permeabilidad, cemento extremadamente retardado, migración de fluidos (gas, petróleo y agua).

Todo esto finalmente puede resultar en numerosos fenómenos adversos tales como la producción de fluidos no deseados, fallas en los trabajos de estimulación debido a la falta de confinamiento de los fluidos de tratamiento, migración de gas a superficie, pérdida de hidrocarburos a zonas de menor presión, etc.

2.1.2 FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DE SU DESPLAZAMIENTO

El éxito de la colocación del cemento depende de un gran número de factores tales como:

⇒ **Parámetros geométricos.**- Geometría del pozo, tamaño de tubería, excentricidad de la tubería, inclinación, presencia de obstáculos al flujo (centralizadores, rascadores, etc.)

Aunque la colocación del cemento puede ser diseñada para minimizar el efecto de unas condiciones adversas en el pozo, buenas prácticas de perforación pueden incrementar las posibilidades de una cementación primaria exitosa.

⇒ **Características de la formación.**- Tipo de formación (consolidada y no- consolidada), temperatura, presión poral y de fractura, permeabilidad, sensibilidad al agua, etc.

⇒ **Densidad, reología, pérdida de filtrado y propiedades fisicoquímicas** del lodo, espaciadores y mezclas de cemento

⇒ **Excentricidad de la Tubería**

Para evaluar la influencia de la excentricidad en la remoción del lodo es necesario definir el concepto de "**Standoff (STO)**" y su efecto para los diferentes tipos de fluido (Newtoniano y No Newtoniano).

El "**Standoff**" es la distancia más pequeña entre el diámetro externo de la Tubería de Revestimiento y el diámetro del hueco dividido entre el espacio anular y expresado como porcentaje.

$$STO = W_n / (R_o - R_i) * 100 \quad (1)$$

donde:

STO	=	Relación del Standoff
W_n	=	Ancho del anular más pequeño
R_o	=	Radio del Hueco abierto
R_i	=	Radio de la Tubería de Revestimiento

Modelos Reológicos para Fluidos de Cementación

Dos regímenes de Flujo se pueden dar cuando aumenta el caudal en una tubería: Laminar y Turbulento. Existen tres modelos matemáticos básicos que representan el comportamiento del fluido, es decir la relación entre el esfuerzo de corte τ (caída de presión por fricción) y la velocidad de corte (caudal o Nre) γ (Figura 1).

En los tres modelos, el Flujo Laminar existe a bajos caudales. Al incrementarse el caudal, se pasa por una zona difícil de caracterizar "zona de transición" (a diferentes velocidades de corte para los diferentes modelos) y finalmente se alcanza el Flujo Turbulento a altos caudales.

En Flujo Laminar las curvas reales concuerdan con los modelos (Newtoniano, No newtoniano (Plástico de Bingham, Ley de potencias)), con excepción del modelo Plástico de Bingham, en el cual existe una relación no lineal a bajas γ , en Flujo Turbulento los tres modelos se desvían del comportamiento real del fluido.

Con el fin de seleccionar el modelo reológico más conveniente para cada uno de los fluidos que va a ser usado en la cementación es necesario tener en cuenta lo siguiente:

- El modelo **Newtoniano** es usado para describir el comportamiento de fluidos como diesel, agua y otros lavadores químicos.
- El modelo **Ley de Potencias** es generalmente usado para los espaciadores pues estos fluidos no exhiben un esfuerzo de corte mínimo (punto de cedencia) y no desarrollan esfuerzo de gel después de un período estático. También es usado para algunas mezclas de cemento y gel.

La limitación más importante de este modelo está relacionada con el hecho de que muchas mezclas de cemento tienen un punto de cedencia mínimo (τ mínimo) y su viscosidad aparente cambia a valores muy altos de γ . Estas características del fluido al no ser tomadas en cuenta, generan valores muy bajos de τ a bajos y altos valores de γ .

- El modelo **Bingham** es generalmente usado para describir las propiedades reológicas de las mezclas de cemento o lodo.

Aun cuando el modelo Bingham incluye el punto de cedencia y una viscosidad aparente limitada a muy altos valores de γ , no todas las mezclas de cemento cumplen este modelo. Cuando a bajos valores de γ se tiene deslizamiento del fluido en las paredes, el valor de τ puede ser sobreestimado (Figura 1). Además a altos valores de γ la estimación de la caída de presión (τ) por fricción puede ser incorrecta.

Flujo de Fluidos en un Anular Excéntrico

El mayor efecto de la excentricidad es distorsionar la distribución de velocidades dentro del anular. No importa el Régimen de Flujo o el tipo de fluido, el flujo favorece el camino de menor resistencia (la parte más ancha del anular).

Efecto del STO en fluidos que no tienen Esfuerzo de Cedencia

(Newtonianos, Ley de Potencia)

El efecto del **STO** en el flujo anular para este tipo de fluidos es cualitativamente equivalente a lo mostrado en la Figura 2, las tuberías representan la parte ancha y la angosta del anular excéntrico. Para un caudal de flujo Q tenemos que: la caída de Presión ($\Delta p / \Delta L$) a través de las dos tuberías será la misma, la velocidad promedio del fluido será mayor en la tubería de mayor diámetro y el Flujo Laminar se establecerá en ambas tuberías cuando se aplique una presión diferencial. A medida que el caudal de flujo aumenta, el N_{re} crítico será excedido primero en la tubería de mayor diámetro y se producirá el Flujo Turbulento. El fluido en la tubería de menor diámetro permanecerá en Flujo Laminar ya que su N_{re} crítico no ha sido alcanzado. Estableciéndose una combinación de regímenes de flujo. A caudales más altos el N_{re} crítico para la tubería de menor diámetro será excedido y se establecerá el Flujo Turbulento en todo el anular.

Para la demostración de estos fenómenos se van a considerar dos casos: Flujo Laminar y Flujo Turbulento de un Fluido Newtoniano.

Flujo Laminar

Usando la relación de caída de presión por fricción (Figura 3), se puede confirmar que tanto la velocidad promedio del fluido como el N_{re} son mayores en la tubería de mayor diámetro, lo cual significa que el Flujo Turbulento se producirá más fácilmente y primero en la tubería mas ancha. Esta situación permite la coexistencia de dos tipos de flujo: Flujo Laminar en la zona angosta y el Turbulento en la zona ancha del anular excéntrico.

Flujo Turbulento

Usando la relación de caída de presión por fricción (Figura 4) se puede confirmar que tanto la velocidad promedio como el N_{re} son mayores en la tubería de mayor diámetro, además sus cocientes respectivos son menores que en el Flujo Laminar, por lo cual el perfil de velocidades de un fluido en un anular excéntrico es más plano en Flujo Turbulento (las velocidades son casi iguales en las dos tuberías) que en Flujo Laminar. Esta es una de las razones por la cual el Flujo Turbulento es preferido ya que el perfil de velocidades de la interface en el caso de dos fluidos también es más plano.

Para ambos casos: Flujo totalmente Laminar o totalmente Turbulento, a menor **STO** se tendrá una mayor diferencia de velocidades entre la zona ancha y la zona angosta del anular.

Por lo tanto las posibilidades de flujo de un fluido Newtoniano o Ley de Potencias en un anular excéntrico a medida que se aumenta el caudal serán: completamente Laminar a bajos caudales, Flujo Laminar y Turbulento cuando el N_{re} crítico (Q_{crit}) a sido excedido solo en la parte ancha y no en la angosta, y finalmente un Flujo Turbulento en todo el anular cuando se excede el N_{re} crítico de la parte angosta (Figura 5).

El limite entre el Flujo Laminar y el Turbulento se puede definir por el ángulo crítico θ_c (Figura 6), a medida que el caudal de flujo se incrementa, θ_c disminuye para finalmente alcanzar un valor de "cero", cuando se tiene flujo Turbulento en todo el anular. θ_c es muy estable y no se reduce a pesar de un prolongado bombeo al mismo caudal. Esto tiene consecuencias importantes durante un trabajo de cementación. Si el Q_{crit} para Flujo Turbulento no es excedido en la parte angosta del anular, entonces el fluido de desplazamiento (lavador, agua, espaciador) fluye sólo por la parte ancha (Flujo Turbulento), formando un canal de lodo muy estable desde del tope al fondo que no puede ser removido aunque se bombee al mismo caudal durante un tiempo prolongado. Al aumentar el caudal el ancho del canal de lodo disminuye, ya que aumenta la zona de turbulencia; durante la coexistencia de Flujo Laminar y Turbulento en el

anular, el lodo solo es desplazado en la parte donde existe Flujo Turbulento (zona ancha), el canal de lodo eventualmente desaparecerá solo si se tiene Flujo Turbulento del fluido desplazante en todo el anular (excede el caudal crítico de la parte angosta). Con lo que se concluye que para una remoción efectiva del lodo todo el anular debe estar en Flujo Turbulento.

Variación del N_{re} en un anular excéntrico

El Flujo completamente Turbulento en un anular concéntrico ocurre a un solo Q_{crit} y N_{re} crítico, esta era la base de los modelos anteriores. En un anular excéntrico sin embargo el N_{re} será diferente en todo el espacio anular ya que depende de la velocidad local promedio y el espacio anular y ambos parámetros varían alrededor del ánulo. Por lo tanto el Q_{crit} y N_{re} crítico para alcanzar Flujo Turbulento serán función del **STO**.

El CEMCADE usa un N_{re} que refleja la situación de un anular excéntrico. Para lo cual aplica un factor de corrección al N_{re} determinado para un anular concéntrico. La condición para que un fluido esté en Flujo Turbulento alrededor de todo el anular excéntrico puede ser expresado como el "Número de Reynolds crítico N_{rec} promedio - excéntrico" que representa el valor mínimo para asegurar Turbulencia en todo el anular (inicio de una completa Turbulencia en la parte estrecha del anular), el cual por definición es el mismo que para un anular concéntrico (N_{rec} concéntrico = $\rho \cdot V_{crit} \cdot D_e / \mu$, **STO** = 100%). El término de corrección, Relación de caudales o Relación de N_{re} = N_{re} promedio- excéntrico / N_{re} concéntrico está representado en la Figura 7. Como se puede ver la Relación de N_{re} se incrementa rápidamente a medida que el **STO** se reduce (anular es más excéntrico), por lo tanto el N_{re} promedio- excéntrico también aumenta ya que el N_{re} concéntrico es constante.

Los resultados son casi insensibles al índice de comportamiento del fluido (n del modelo de Ley de Potencia). En realidad la curva mostrada es la superposición de las tres curvas ($n = 1$, $n = 0.5$, $n = 0.2$). Para los fluidos Newtonianos el factor de corrección puede ser usado directamente para modificar el caudal de flujo o como Relación de N_{re} , para otros fluidos esta es solo una Relación de N_{re} .

Si para un fluido Newtoniano en un pozo totalmente centralizado (**STO**= 100%) el $Q_{crit} = 5$ bpm, el Q_{crit} con 70% de **STO** será $2 \times 5 = 10$ bpm y la Relación de $N_{re} = 2$ (Figura 7) lo que significa que alcanzando un N_{rec} de 3000 en la zona más ancha (turbulencia), el flujo en la zona más estrecha no estará todavía en turbulencia. Será necesario un N_{re} promedio- excéntrico de 6000 para asegurar turbulencia en toda la sección del anular.

Una descentralización inferior a 60 % torna prácticamente imposible la remoción del lodo en Flujo Turbulento. Los caudales requeridos para este régimen de bombeo, alcanzan valores imposibles de obtener ó antieconómicos. En estos casos el caudal crítico debe ser optimizado solo para la zona donde se necesita 100 % de remoción del lodo y no para todo el intervalo a ser cementado. Lo ideal es mantener un **STO** encima de 70 %.

Efecto del STO en fluidos que tienen Esfuerzo de Cedencia (Bingham)

El efecto del **STO** en el flujo anular de fluidos Bingham en los cuales se debe exceder el Punto de Cedencia para que exista flujo es cualitativamente equivalente a lo mostrado en la Figura 8, las tuberías representan la parte ancha y la angosta del anular excéntrico. Para un caudal de flujo Q se tiene: la caída de Presión ($\Delta p / \Delta L$) a través de las dos tuberías será la misma, las velocidades promedio serán siempre mayores en la tubería de mayor diámetro sin importar el régimen de flujo e inicialmente solo se producirá el flujo en la tubería de mayor diámetro donde el Esfuerzo de Corte en la Pared excede el punto de cedencia del fluido, esto corresponde a un Flujo Laminar en la parte ancha del anular y no-flujo en la parte angosta. A medida que el caudal de flujo aumenta, el Esfuerzo de Corte en la Pared en la tubería de menor diámetro excede el punto de cedencia del fluido y se produce el flujo, la velocidad promedio del fluido también se incrementara en la parte ancha pero seguirá en Flujo Laminar, el efecto es un flujo Laminar en todo el anular. A caudales mas altos, la Turbulencia será excedida primero en la tubería de mayor diámetro dando una combinación de Flujo Laminar y Flujo Turbulento en el anular. Eventualmente el caudal es suficientemente alto, de modo que los criterios para Flujo Turbulento en la tubería de menor diámetro son alcanzados y se producirá el Flujo Turbulento en todo el anular

Para la demostración de estos fenómenos se va a considerar el flujo Laminar de un fluido Bingham.

Flujo Laminar

Considerando el modelo básico de aproximación (Figura 8), el cual asume que la geometría excéntrica anular es equivalente a rectángulos independientes de diferentes anchos y la expresión para el Esfuerzo de Corte en la Pared $T_w = D/4(dp/dL)$, donde "D" es el espacio anular. En la Figura 9 se observa que para un caudal dado ($dp/dL=cte$) T_w varia solo con D y es mayor en la tubería de mayor diámetro.

Con un mismo fluido Binham en ambas tuberías, el fluido comenzará a fluir primero en la tubería de mayor diámetro ya que T_w ha excedido el esfuerzo de cedencia del fluido. Esto

muestra que existe una desigual distribución del T_w en el anular, siendo un valor máximo en la parte más ancha ($D_{max} = \{2- STO\}\{R_o-R_i\}$), y un valor mínimo en la parte más angosta ($D_{min} = STO\{R_o-R_i\}$), mientras el Punto de Cedencia del fluido esté en medio de los valores T_w máximo y mínimo ($T_w \text{ max.} > T_y > T_w \text{ min.}$), el fluido en la parte angosta del anular ($T_w \text{ min.}$) estará estacionario. Al incrementarse el caudal, se incrementa la caída de presión (dP/dL) entonces el T_w en la tubería de menor diámetro eventualmente será mayor que el punto de cedencia del fluido y se producirá el flujo en esta tubería.

Las posibilidades de flujo de un fluido Bingham (lodos y mezclas de cemento) en un anular excéntrico a medida que se aumenta el caudal son 4 (ver Figura 10). Sin embargo a bajos STO es posible que coexistan tres regímenes de flujo, no-flujo en la zona angosta si el T_w es menor que el punto de cedencia del fluido, Flujo Turbulento en la parte más ancha y Flujo Laminar en la parte intermedia (Figura 11). Con esta distribución de velocidades la remoción del fluido sólo será efectiva en la parte más ancha (Turbulento), en la parte angosta el fluido estará estático generando un canal y entre los extremos de no-flujo y flujo completamente Turbulento la remoción del lodo puede ser muy pobre.

En un proceso de cementación, siendo el lodo un fluido Bingham, a bajos caudales el fluido desplazante (Bingham, Ley de Potencias) sólo fluye en la parte ancha del anular dejando un canal de lodo estable en la parte angosta ya que en esta zona el esfuerzo de corte en la pared del fluido desplazante ($T_{w-Desplazante}$) es todavía menor que el punto de cedencia del lodo. A medida que se incrementa el caudal, los $T_{w-Desplazante}$ alrededor del ánulo se incrementan y al exceder el punto de cedencia del lodo el ancho del canal del lodo se reduce. Eventualmente el caudal se incrementa a un nivel tal que el $T_{w-Desplazante}$ excede el punto de cedencia del lodo en todo el anular y se establece el Flujo Laminar del fluido desplazante en todo el anular. Una remoción eficiente del Lodo en Flujo Turbulento es muy difícil considerando las altas reologías de este tipo de fluidos. Pero puede ser alcanzada cumpliendo ciertos criterios para un flujo completamente Laminar. Esta es la técnica de Flujo Laminar Efectivo (FLE).

La excentricidad de la tubería (STO) juega un papel muy importante en la eficiencia del desplazamiento del lodo, bajo determinadas condiciones se puede dejar un canal de lodo muy estable en la parte estrecha del anular tanto en Flujo Turbulento como en Flujo Laminar. Si el desplazamiento se realiza en Flujo Turbulento se debe buscar la Turbulencia en todo el anular, y si se realiza en Flujo Laminar el T_w en todo el anular debe exceder el punto de cedencia del lodo, esto asegurará un completo desplazamiento del lodo en el anular excéntrico.

⇒ Preparación del pozo (Caudal de Acondicionamiento)

Como es bien sabido, el mantenimiento y acondicionamiento del lodo previo al proceso de cementación son aspectos vitales para la preparación del pozo ya que las propiedades del lodo que favorecen la perforación no siempre favorecen una buena remoción del lodo.

Con el fin de obtener unas propiedades homogéneas (en la entrada y salida del pozo) en el lodo antes de la cementación, éste debe ser circulado por lo menos dos volúmenes de hueco a un caudal que permita el flujo alrededor de todo el anular (Mínimo caudal de circulación de lodo en un anular excéntrico) o al más alto caudal anular esperado durante la cementación, cualquiera de ellos que sea el más grande. Sin embargo la experiencia ha mostrado que el caudal de circulación debe estar limitado algunas veces para prevenir la erosión del pozo. Es necesario asegurarse que la velocidad anular durante la circulación nunca exceda la velocidad anular en la sección del hueco abierto/Drill collar.

Mínimo caudal de circulación en un anular excéntrico

Un fluido con un alto punto de cedencia (T_y) y esfuerzo de gel como la mayoría de los lodos, a un bajo caudal puede permanecer estático en la parte estrecha del anular excéntrico mientras que existe flujo en la parte ancha del anular. Esto es debido a que el T_w generado por la caída de presión por fricción del lodo en la parte estrecha es menor que el punto de cedencia del fluido. Esta situación tiene que ser evitada en la circulación del lodo de perforación ya que las propiedades del lodo estacionario pueden ser afectadas por gelación o deshidratación debido al filtrado, lo cual hará la remoción del mismo aun más difícil.

Es por lo tanto muy importante que el fluido de perforación este fluyendo alrededor de todo el anular durante la circulación. Esta condición puede ser satisfecha si el T_w en la parte estrecha del anular es mayor que el punto de cedencia del fluido. Esto implica que el gradiente de presión por fricción debe ser mayor que un valor mínimo, este valor mínimo es llamado Mínimo Gradiente de Presión (MPG).

$$\left(\frac{dP}{dL}\right) > 4T_y / [STO(D_0 - D_i)] \quad (2)$$

El MPG depende del **STO** y la reología del fluido desplazado (T_y). Puede ser transformado en un caudal mínimo de circulación Q_{min} , el cual puede ser calculado en el CEMCADE ingresando el lodo tanto como fluido desplazado y desplazante. Un valor pequeño para Q_{min} significa un desplazamiento más fácil del lodo. La eficiencia del proceso de circulación mejora a medida que la diferencia entre el caudal de circulación y el Q_{min} se incrementa. Sin embargo existen

otros parámetros tales como: distribuciones de presiones de fractura, estabilidad del hueco, equipos (Laina) que pueden imponer el límite máximo para la circulación de lodo.

Cuando el Q_{min} no puede ser alcanzado (partes del hueco de gran diámetro), entonces es extremadamente recomendable el movimiento de la tubería durante el acondicionamiento del lodo y la colocación del cemento.

⇒ **Movimiento de la tubería**

El movimiento de la tubería (reciprocación y/o rotación) desde el acondicionamiento del lodo hasta el final del desplazamiento del cemento ayuda a quebrar el lodo gelificado y cambia la geometría de flujo (Figura 12). De esta forma se mejora tanto la eficiencia de circulación como el desplazamiento, es por estas razones que el movimiento de la tubería es particularmente recomendado cuando el Q_{min} para el desplazamiento de lodo por lodo no puede ser alcanzado

⇒ **Uso de tapones**

Durante el desplazamiento de los fluidos dentro de la tubería, la caída de los fluidos pesados (espaciador y mezclas de cemento) a través de fluidos de menor densidad (lavadores, lodo) genera un aislamiento zonal inadecuado, fragüe retardado del cemento, falta de dureza del cemento entre el collar flotador y el zapato y elevadas presiones de desplazamiento debido a la mezcla de fluidos incompatibles. La severidad de este fenómeno depende del diámetro interior de la tubería, el caudal de desplazamiento, el régimen de flujo y la diferencia de densidades, pero generalmente puede ser superado con el uso de tapones de fondo y de tope, los cuales ayudan a separar y prevenir la contaminación de los fluidos a medida que estos se mueven hacia abajo dentro de la tubería.

Cuando se usa un solo tapón la siguiente secuencia es recomendada:

- Lodo- lavador- Tapón de Fondo- mezcla de cemento
- Lodo- Tapón de Fondo- espaciador- mezcla de cemento
- Lodo- lavador- Tapón de Fondo- espaciador- mezcla de cemento

Si el espaciador está en Flujo Turbulento en el interior de la tubería y el diferencial de densidad entre el cemento y el espaciador es substancialmente mayor que el existente entre el lodo y el espaciador, la siguiente secuencia puede ser usada:

- Lodo- espaciador- Tapón de Fondo- mezcla de cemento

Sin embargo, por las razones anteriormente mencionadas es recomendable el uso de dos tapones de fondo.

2.1.3 TIPOS DE FLUJO

Existen dos métodos, para el desplazamiento efectivo del lodo y una subsecuente colocación del cemento, la selección del método es dependiente del pozo, geometría de la tubería, excentricidad y reología de los fluidos.

2.1.3.1 FLUJO TURBULENTO

Este tipo de flujo es el preferido debido a lo fácil de su diseño y aplicación, y también por el éxito alcanzado en los trabajos de cementación. Sin embargo en ciertos casos el Flujo Turbulento no es la mejor opción. En formaciones débiles o muy poco consolidadas, una turbulencia excesiva puede ocasionar problemas de estabilidad además en formaciones muy depletadas y permeables se puede producir una deshidratación excesiva debido al mayor diferencial de presión aplicado al fluido en contacto con la formación.

Las principales limitaciones para alcanzar Flujo Turbulento son: la reología del fluido, las condiciones del pozo y el equipo de bombeo. Los fluidos usados para este tipo de flujo son lavadores y espaciadores especialmente diseñados, en los cuales los esfuerzos generados por la viscosidad y la densidad son pequeños, es el efecto de remolino sobre las partículas del fluido lo que mantiene un perfil de velocidades plano. La Turbulencia crea un efecto de arrastre/erosión/dilución en la interface del fluido y el intercambio de fluidos entre la parte ancha y la parte angosta del anular, crea una fuerza de arrastre capaz de romper o dispersar bolsas de lodo deshidratado o lodo estacionario gelificado.

El diferencial de densidades no es un factor importante cuando se usa la técnica de Flujo Turbulento como es evidenciado por un efectivo desplazamiento de lodo (más pesado) por agua, sin embargo supone el uso de un fluido desplazante de menor viscosidad que el lodo que podría canalizar en Flujo Laminar si el Flujo Turbulento no es alcanzado en todo el anular.

Se debe procurar colocar la mezcla de cemento en Flujo Turbulento. A medida que esto sea posible, con valores recomendados de $T_y = 5-8 \text{ lb}/100 \text{ ft}^2$ y si son menores que $T_y = 2$ se debe chequear la estabilidad de la mezcla (agua libre y sedimentación). Sin embargo para poder remover el lodo en Flujo Turbulento, la mezcla de cemento no necesita ir en Flujo Turbulento pero sí el volumen necesario de Lavadores o agua delante de la mezcla. Si existe un problema de control del pozo, se deben usar espaciadores para Flujo Turbulento y adicionalmente pequeños volúmenes de Lavador no solo espaciador ya que el Lavador adelgaza el lodo delante del espaciador o de la mezcla de cemento además deja la tubería/formación mojada al agua.

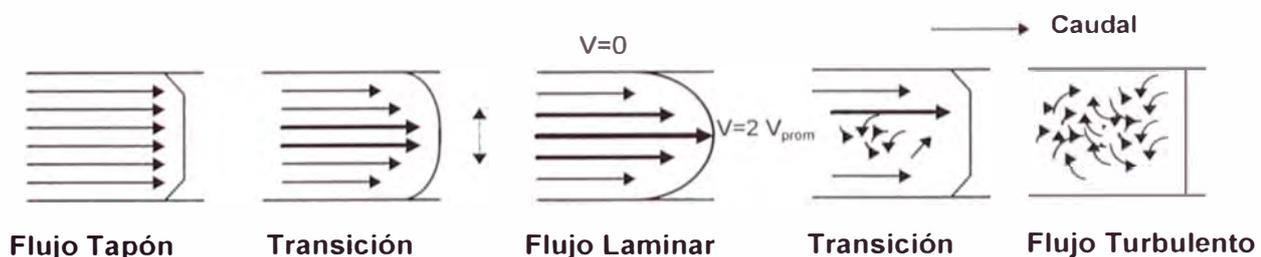
Estudios de campo han mostrado que incrementando el tiempo de contacto se mejora la remoción del lodo (el tiempo de contacto es el tiempo durante el cual una sección de la formación esta en contacto con el fluido en turbulencia). 10 minutos de tiempo de contacto es lo óptimo recomendado (sin embargo, si las condiciones del pozo son favorables se puede tener hasta 5 minutos como mínimo), o un volumen de lavador de 750 ft en el anular.

2.1.3.2 FLUJO LAMINAR EFECTIVO (FLE)

El desplazamiento en Flujo Laminar es usado cuando el desplazamiento en Flujo Turbulento no puede ser alcanzado en el anular debido a huecos de gran diámetro, pozos altamente desviados, tipo de fluido, inadecuada centralización de la tubería, bajos gradientes de fractura, alta presión poral y limitaciones de equipo.

Por un largo período de tiempo se ha considerado solo dos regímenes de flujo para alcanzar una remoción adecuada del lodo: el Flujo Turbulento y el Flujo Sub-laminar, también llamado Flujo Tapón. Se creía que la remoción del lodo en Flujo Laminar era muy mala, tanto por tener un perfil de velocidad parabólico que favorecía la canalización del fluido desplazante, como por mantener las partículas del fluido estacionarias en la pared. Solo años mas tarde muchos investigadores confirmaron que el perfil de velocidad no tiene nada que ver con la interface de dos fluidos fluyendo en Laminar, y es la interface de los fluidos y no el perfil de velocidad de cada uno lo que tiene el principal efecto en la remoción del lodo, esto significa que se puede conseguir una buena remoción del lodo aún en Flujo Laminar mientras la interface entre el fluido desplazado y desplazante sea perfectamente plana, a pesar que el perfil de velocidad del fluido desplazante sea parabólico, esta técnica se llama Flujo Laminar Efectivo (FLE).

PERFIL DE VELOCIDAD



La Técnica de Flujo Laminar Efectivo (FLE) plantea cuatro criterios que permiten optimizar las condiciones para la formación de un perfil estable y uniforme de velocidades(plano) en la interface entre el fluido desplazado y desplazante, con el fin de mejorar la remoción del lodo en Flujo Laminar:

- Diferencial de Densidad
- Jerarquía de Presión por Fricción
- Mínimo Gradiente de Presión(MPG)
- Diferencial de Velocidades

CRITERIO DE DIFERENCIAL DE DENSIDAD

La densidad del fluido desplazante debe ser por lo menos 10 % mayor que la del fluido desplazado.

$$\text{Minimo.....10\%} \longrightarrow \rho_2 > 1.1\rho_1 \quad (3)$$

Este criterio es independiente de la geometría del hueco(tamaño), pero tiene mucha importancia en la forma de la interface para tuberías verticales. A medida que el diferencial de densidad entre el fluido desplazado y el fluido desplazante se incrementa, la interface se vuelve mas plana y estable, ayudando a minimizar la canalización. En la mayoría de los casos la densidad del lodo y de la mezcla de cemento no puede ser cambiada, sin embargo la densidad del espaciador puede ser ajustada como el valor medio entre el lodo y el cemento. " $\rho_{\text{Mezcla de cemento}} > \rho_{\text{Espaciador}} > \rho_{\text{Lodo}}$ "

Cuando se tiene un lodo de alta densidad es mejor tener la mayor diferencia de densidad entre el lodo y el espaciador y la densidad del espaciador cercana a la de la mezcla de cemento.

CRITERIO DE JERARQUIA DE PRESION POR FRICCION

El fluido desplazante debe generar mayor presión de fricción que el fluido desplazado, así el fluido desplazado fluirá mas fácilmente que el fluido que el fluido desplazante. Una diferencia de 20 % es recomendable.

$$\text{Minimo.....20\%} \longrightarrow \left(\frac{dP}{dL}\right)_2 > 1.2\left(\frac{dP}{dL}\right)_1 \quad (4)$$

Es muy importante que el primer paso sea confirmar la existencia de un diferencial de presión por fricción igual o mayor que 40 % entre el lodo y la mezcla de cemento, en caso negativo no hay posibilidad de diseñar un espaciador que cumpla este criterio. La combinación del diferencial de Densidad y el de Presión por Fricción ayuda a generar una interface plana y estable reduciendo la posibilidad de canalización de un fluido dentro de otro.

Para cambiar los parámetros reológicos del fluido desplazante y/o fluido desplazado y satisfacer este criterio se puede hacer lo siguiente:

- Reducir el punto de cedencia, densidad o contenido de sólidos del Lodo
- Incrementar la viscosidad del espaciador

- Incrementar el punto de cedencia y/o la viscosidad plástica de la mezcla de cemento
- Incrementar el diferencial de densidades y en el caso extremo en el cual las densidades del lodo, espaciador y mezcla de cemento son muy cercanas, es necesario hacer que los fluidos tengan diferente caída de presión por fricción para poder cumplir el segundo criterio.

CRITERIO DE MINIMO GRADIENTE DE PRESION (MPG)

Para tener un fluido Bingham(T_y) fluyendo alrededor de todo el anular excéntrico se debe cumplir:

$T_{w-Desplazante} > T_y$ en la parte mas estrecha de anular. Esta desigualdad puede ser relacionada con una mínima caída de presión o un caudal mínimo(Q_{min}).

El Q_{min} que asegura que el fluido desplazado(T_y) esta fluyendo en Flujo Laminar en todo el anular excéntrico es el Mínimo Gradiente de Presión(MPG).

$$\left(\frac{dP}{dL}\right)_2 + (\rho_2 - \rho_1)g \cos\theta > 4T_y / [STO(D_o - D_i)] \longrightarrow Q_{min} \quad (5)$$

donde :

ρ	=	Densidad del fluido
g	=	Constante gravitacional
θ	=	Angulo de inclinación
dP	=	Cambio de Presión
dL	=	Cambio de longitud
T_y	=	Punto de cedencia del Fluido desplazado
D_o	=	Diámetro del anular
D_i	=	Diámetro de la tubería
STO	=	% Standoff
1	=	Parte estrecha del anular(Fluido desplazado)
2	=	Parte ancha del anular(Fluido desplazante)

La diferencia positiva en densidad entre el fluido desplazante y el fluido desplazado contribuye al esfuerzo de corte en la pared del fluido desplazante($T_{w-Desplazante}$) para exceder el punto de cedencia del fluido desplazado(T_y) a menores caudales.

El criterio de MPG :

- Asegura que el fluido desplazado fluye en todo el anular excéntrico
- Es función del **STO**. Cuando los valores del **STO** tienden a cero este valor diverge (se hace muy grande), además no se aplica a tuberías perfectamente centralizadas.

- Sólo es aplicado a los fluidos que exhiben un punto de cedencia (fluidos Binham). Por lo tanto, los fluidos Newtonianos y los "Power Law" no necesitan cumplir el MPG antes de empezar a fluir.
- Proporciona el Mínimo Caudal Anular para asegurar el acondicionamiento del lodo previo a la cementación

CRITERIO DE VELOCIDAD DIFERENCIAL

Para mantener una interface estable y uniforme a medida que el fluido se mueve hacia arriba en el anular y así prevenir la formación de canales (lodo, espaciador), se requiere que la interface se mueva a la misma velocidad en todo el anular excéntrico. Esto no es posible pues el fluido siempre tiende a moverse más rápido en la parte más amplia (Figura 13).

Las curvas de gradiente de presión total ($P_h + P_{fricción}$) de los fluidos desplazado (1) y desplazante (2) vs. Velocidad promedio (V) pueden ser usadas para mostrar este efecto (Figura 14). A velocidad "cero", solo la presión hidrostática esta actuando y el gradiente de presión total es mayor para el fluido desplazante (2) que para el desplazado (1). A medida que V se incrementa, la presión por fricción del fluido 1 se incrementa más rápidamente como la presión por fricción del fluido 2 debido principalmente al área mas reducida. Este efecto es a la vez minimizado por la menor reología del fluido 1. Finalmente las curvas de los dos fluidos se intersectan en una "velocidad critica" (V_c) y la presión por fricción continua desarrollándose aún mas rápidamente en el fluido 1.

Con el fin de asegurar flujo en esta parte más estrecha (1) es necesario que su gradiente de presión total sea menor que la gradiente de presión total en la parte mas ancha (2):

$$\rho_1 g \cos\theta + (dP / dL)_1 \leq \rho_2 g \cos\theta + (dP / dL)_2 \longrightarrow Q_{max} \quad (6)$$

Como muestra en la Figura 14, existe una velocidad máxima (V_c) para la cual esta desigualdad de cumple y este es el caudal máximo (Q_{max}). A caudales menores que el Q_{max} , podrá equilibrarse la velocidad de la interface entre la parte más ancha y la más estrecha del anular excéntrico, o sea el fluido desplazado (V_1, ρ_1), tratará de alcanzar al fluido desplazante (V_2, ρ_2).

En resumen, el criterio de Velocidad Diferencial es función del **STO**, no se aplica a tuberías perfectamente centralizadas, también debe ser aplicado desde la profundidad total del pozo hasta el tope de la zona de interés para asegurar una buena remoción del lodo y finalmente proporciona un rango más amplio de caudales (Q_{max}) cuando se tiene un mayor diferencial de densidades y un mejor **STO**.

Para minimizar el Diferencial de Velocidades en un anular excéntrico se necesita reducir el punto de cedencia del lodo de manera que se reduce el esfuerzo de corte en la pared necesario para iniciar el movimiento en la parte mas estrecha del anular, también es necesario optimizar el STO para tener una distribución de velocidades mas uniforme, usar un fluido desplazante viscoso con el fin de reducir su facilidad de flujo en la parte ancha del anular, desplazar a bajos caudales y Mover la tubería.

La **Técnica de Flujo Laminar Efectivo (FLE)** debe ser utilizada no solo en la interface lodo-espaciador, espaciador-cemento sino también para la interface entre la mezcla inicial y final especialmente si se requiere que esta última esté a una profundidad determinada para solucionar un problema de migración de gas (contiene aditivos especiales) o simplemente por tener mejores propiedades mecánicas. En este caso un desplazamiento eficiente de la mezcla final alrededor de la tubería detrás de la mezcla inicial es tan critica como un desplazamiento eficiente de la mezcla inicial detrás del lodo, lavadores y/o espaciadores.

Los cuatro criterios del FLE han sido implementados en el CEMCADE y así se obtiene un rango aceptable de caudales anulares para un grupo de condiciones.

El Q_{min} en el anular es el mayor de los siguientes valores:

- MPG- Mínimo caudal para tener MOBILIDAD en la parte mas angosta del anular para fluidos que tienen esfuerzo de cedencia
- Comienzo de la jerarquía de 20% de Presión por Fricción
- Comienzo de un frente estable entre la zona ancha y la zona angosta del anular (Criterio de Velocidad Diferencial-Opcional)
- Un limite mínimo arbitrario de 1 bpm

El Q_{max} en el anular es igual al menor de los siguientes valores:

- Fin de la jerarquía de 20% de Presión por Fricción
- Establecimiento de turbulencia del fluido desplazante en todo el anular (el flujo turbulento debe ser usado)
- Fin de un frente estable para la interface entre la zona ancha y la zona angosta del anular (Criterio de Velocidad Diferencial- opcional)
- Un limite arbitrario de 40 bbl/min

Los principales parámetros que afectan estos caudales limites (Q_{min} , Q_{max}) son las reologías de los fluidos, sus densidades, la geometría, desviación del pozo, y la excentricidad de la tubería.

Los criterios para la Técnica de Flujo Laminar Efectivo (FLE) no se muestran en orden de importancia. El criterio de Diferencial de Densidades puede ser imposible de cumplir debido a las condiciones del pozo, el criterio de Jerarquía de Presión por Fricción y el criterio MPG deben ser satisfechos para tener una remoción efectiva del lodo, ninguno de los criterios es más importante que el otro. Si se necesita una buena remoción de lodo hasta el tope del cemento, la aplicación del criterio de Diferencial de Velocidades es obligatorio, si no es satisfecho, el lodo probablemente será desplazado eficientemente solo cerca del zapato. En el Cemcade este último criterio es "opcional" ya que algunas veces no es posible encontrar una solución o esta es muy restrictiva especialmente a muy bajo **STO** o bajo diferencial de densidades (el Q_{\min} es grande y el Q_{\max} es muy bajo reduciéndose el rango aceptable de caudales de bombeo).

El volumen y/o altura del anular para el fluido de desplazamiento es el factor determinante del éxito del Flujo Laminar Efectivo. Se recomienda un mínimo de 60 bbl o un volumen equivalente a 500 ft de longitud en el anular para el espaciador además de 20-40 bbl de lavador químico entre el lodo y el espaciador debido a que este fluido puede ir en turbulencia alrededor de la tubería y ayudar a la remoción del lodo, si no va en flujo turbulento, se mezclará con el lodo reduciendo su reología en la interface por medio de una dilución. Incrementando así la eficiencia de desplazamiento del lodo y dejando la tubería/formación mojada al agua.

Un diseño completo de remoción del lodo es proporcionado por el programa **CEMCADE**, ofreciendo recomendaciones para:

- Selección del caudal de circulación del lodo previo a la cementación, asegurando que todo el lodo es móvil en el anular excéntrico; si no lo es será necesario mover la tubería o mejorar la centralización
- Selección del régimen de flujo mas apropiado de acuerdo a los datos del pozo (Turbulento o Flujo Laminar Efectivo)
- Selección de los Lavadores y/o Espaciadores
- Selección de los volúmenes de Lavadores y/o Espaciadores
- Selección de la secuencia de bombeo compatible con el régimen de flujo seleccionado

Además ofrece la posibilidad de investigar la influencia de los diferentes parámetros (**STO**, caudales, reología) en la remoción del lodo.

Limitaciones para el Flujo Laminar Efectivo (FLE)

- Las soluciones están muy relacionadas con los parámetros del pozo. Algunas veces no es posible proponer una solución sin mejorar la centralización, modificar las propiedades reológicas del espaciador y/o mezcla de cemento o acondicionar el lodo.
- Se necesita un buen conocimiento de las propiedades reológicas para realizar un diseño apropiado.
- Se requiere un buen control de las propiedades reológicas durante la fase de la ejecución para igualar el diseño hecho con la Técnica de Flujo Laminar Efectivo.
- Cuando la técnica del FLE es usada para pozos altamente desviados u horizontales se debe tomar en cuenta que el primer criterio de diferencial de densidades no ayuda a aplanar el perfil de la interface; contrariamente puede ser detrimental debido al fenómeno llamado "cuña" según el cual el fluido más denso se coloca en la parte más profunda del pozo. Se debe priorizar el criterio de jerarquía de presión por fricción, y verificar que el MPG pueda ser cumplido.

2.1.3.3 FLUJO TAPON

Esta técnica fue derivada de estudios teóricos y trabajos experimentales, mostrando que se puede obtener un desplazamiento eficiente a bajos caudales cuando el proceso es gobernado por las fuerzas de flotación las cuales tienden a aplanar el perfil de la interface entre el fluido desplazante de alta densidad y el fluido desplazado de baja densidad.

El flujo del fluido en esta técnica es paralelo a los ejes, con velocidades idénticas, su movimiento es en láminas, las partículas no se deslizan entre sí como en el flujo laminar. No es un modelo de flujo en si, es solo una condición especial de flujo laminar, donde la viscosidad del fluido es alta y la velocidad de corte muy baja. Esto hace que se comporte como un tapón fluyendo a velocidad constante.

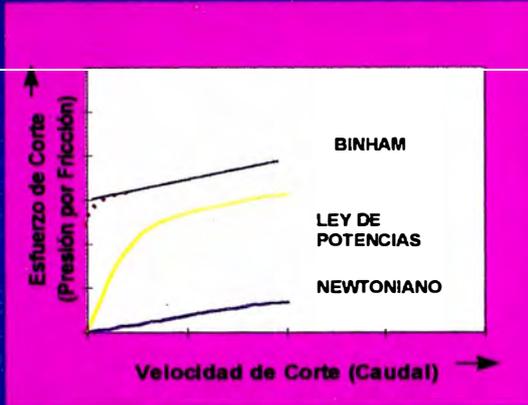
En la industria hay cierta confusión con respecto a cuan bajo debe estar definido este caudal. El limite superior estaba dado por una velocidad máxima de 90 ft/min en el anular (derivado de experimentos en un anular concéntrico), un diferencial de densidades(0.2 - 1 ppg) y de esfuerzo de gel (20 lbf/100 ft²) entre el fluido desplazante y el fluido desplazado, un máximo número de Reynolds de 100 ó 200 ó una relación máxima tapón a tubería (calidad de tapón = d/D) de 0.7 o 0.8, pero no estaba claro el fluido que debía ser considerado. Además se debe tener en cuenta que los tres criterios no son equivalentes. La idea era aplanar el perfil de velocidades de un fluido dado, sin embargo, como se mencionó anteriormente, el perfil en la interface entre dos fluidos tiene muy poco que ver con el perfil de velocidades de cada fluido independiente lejos de la interface.

El Flujo Tapón es extremadamente sensible a la centralización y a las altas temperaturas. Es muy problemático en pozos profundos y de diámetro anular reducido. A medida que se incrementa la temperatura o se reduce el espacio anular, muy difícilmente el fluido se comportará en flujo tapón: la temperatura reduce la viscosidad cambiando el perfil de velocidad y la velocidad de corte en una sección angosta será siempre mayor saliendo el fluido de su flujo tapón. Esto a su vez obliga a incrementar la viscosidad a valores extremadamente elevados (casi imbombeables en superficie) y a reducir drásticamente el caudal de desplazamiento, hasta valores imprácticos como 0.2 o 0.3 bpm, lo cual en una tubería descentralizada resulta estático en las partes angostas. Esta combinación de factores hizo que el flujo tapón fuera totalmente abandonado como método de remoción del lodo. Aunque teóricamente sea posible su utilización en pozos superficiales de gran diámetro.

2.1.3.4 DIFERENCIAS PRINCIPALES ENTRE FLE Y FLUJO TAPON

- Tanto en la técnica de Flujo Tapón como en el FLE se toma en cuenta el criterio de diferencial de densidades la cual tiene mucha influencia en la forma de la interface en una tubería vertical.
- La diferencia en viscosidad aparente entre los fluidos es un segundo factor que influencia la forma de la interface lo cual si es tomado en cuenta por la técnica FLE y no por la técnica de Flujo tapón.
- El Flujo Tapón no toma en cuenta la excentricidad de la tubería, lo cual si es considerado por el FLE
- La técnica del Flujo Tapón recomienda fluidos con alto esfuerzo de gel sin chequear su influencia en el flujo en la parte estrecha de la tubería, lo cual si es tomado en cuenta en el criterio MPG del Flujo Laminar Efectivo.
- La técnica de Flujo Tapón tenía solo la finalidad de aplanar el perfil de la interface sin minimizar la velocidad diferencial entre la parte ancha y la parte estrecha del anular, lo cual si es considerado en el criterio de Velocidad Diferencial.

MODELOS DE FLUJO



$$\tau = \mu \cdot \gamma$$

$$\tau = \tau_p + \mu_p \gamma$$

$$\tau = k \cdot \gamma^n$$

K = Índice de consistencia (Viscosidad)

n = Índice de Comportamiento

(definición del comportamiento Newt.)

$n < 1$ = Fluido Ley de Potencias

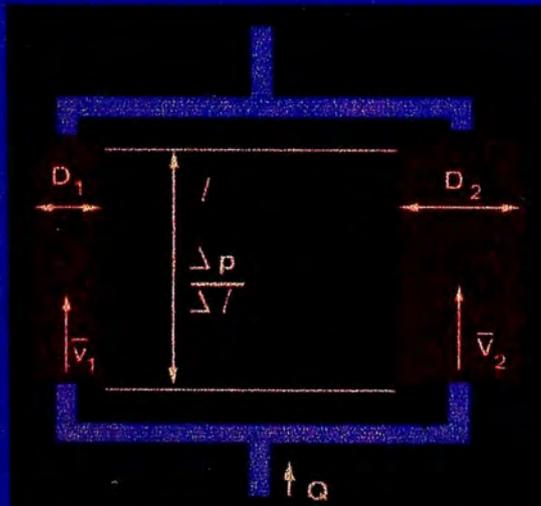
$n > 1$ = Fluido Dilatante

$n \rightarrow 1$ = Comportamiento del Fluido se acerca más al de un Fluido Newtoniano

Fig. 1

REMOCION DEL LODO

EL EFECTO DEL STO EN EL FLUJO ANULAR ES QUALITATIVAMENTE EQUIVALENTE AL SIGUIENTE PATRON DE FLUJO



$$v_2 > v_1$$

$$N_{Re2} > N_{Re1}$$

$$(dP/dL)_1 = (dP/dL)_2$$

Flujo Newt. y No Newt

Laminar ó Turbulento

Fig. 2

REMOCION DEL LODO

PARA UN FLUIDO NEWTONIANO
DE VISCOSIDAD μ , DENSIDAD ρ

En Flujo Laminar

Velocidad

$$\frac{\Delta p}{\Delta l} = \frac{32 \mu V_1}{D_1^2} = \frac{32 \mu V_2}{D_2^2} \Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2$$

Si $D_2 = 2D_1 \Rightarrow V_2 = 4V_1$

Reynolds

$$N_{re2} = \frac{\rho \cdot V_2 \cdot D_2}{\mu} = \frac{\rho \cdot (4V_1) \cdot (2D_1)}{\mu}$$

$$\Rightarrow N_{re2} = 8 N_{re1}$$

Fig. 3

REMOCION
DE LODO

PARA UN FLUIDO NEWTONIANO
DE VISCOSIDAD μ , DENSIDAD ρ

En Flujo Turbulento

Velocidad

$$\frac{\Delta p}{\Delta l} = \frac{0.241 \rho^{0.75} \mu^{0.25} V_1^{1.75}}{D_1^{1.25}} = \frac{0.241 \rho^{0.75} \mu^{0.25} V_2^{1.75}}{D_2^{1.25}}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{0.714}$$

Si $D_2 = 2D_1 \Rightarrow V_2 = 1.64V_1$

Reynolds

➔ Perfil de velocidades más plano

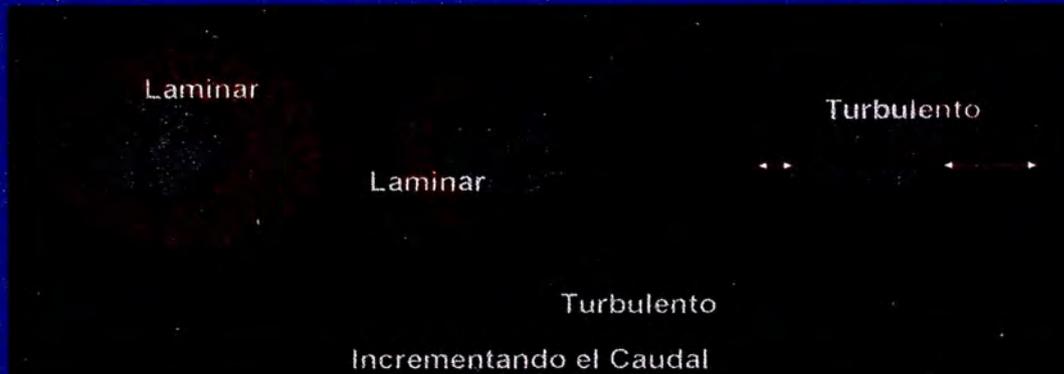
$$N_{re2} = \frac{\rho \cdot V_2 \cdot D_2}{\mu} = \frac{\rho \cdot (1.64V_1) \cdot (2D_1)}{\mu}$$

$$\Rightarrow N_{re2} = 3.28 N_{re1}$$

Fig. 4

REMOCION
DEL LODO

POSIBILIDADES DE FLUJO FLUIDO NEWTONIANO & LEY DE POTENCIA



$$V_2 > V_1$$

$$N_{Re\text{ Crit. zona laminar}} > N_{Re2} > N_{Re1}$$

$$V_2 > V_1$$

$$N_{Re2} > N_{Re\text{ Crit. zona turbulenta}}$$

$$N_{Re1} < N_{Re\text{ Crit. zona turbulenta}}$$

$$V_2 > V_1$$

$$N_{Re2} > N_{Re1} > N_{Re\text{ Crit. zona turbulenta}}$$

$$N_{Re\text{ Crit. zona turbulenta}} > N_{Re\text{ Crit. zona laminar}}$$

Fig. 5

REMOCION
DEL LODO

INFLUENCIA DE LA EXCENTRICIDAD EN EL REGIMEN DE FLUJO TURBULENTO



Tuberías Concéntricas, al
Caudal Crítico Q_c

Constante

• Geometría

• N_c

• Veloc. Prom.

Tuberías Excéntricas
al mismo Caudal Q_c

No constante

• Geometría

• N_c

• Veloc. Prom.

Fig. 6

REMOCION
DEL LODO

FACTOR DE CORRECCION - FLUJO TURBULENTO EXCENT. FLUIDO NEWTONIANO & LEY DE POTENCIAS

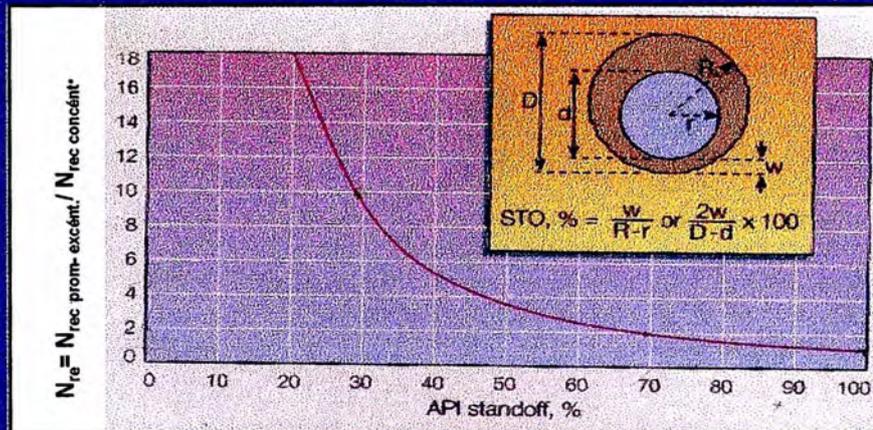
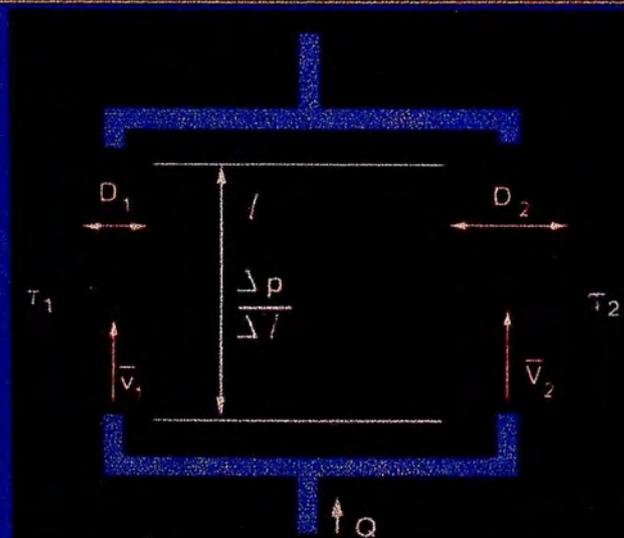


Fig. 7

REMOCION
DEL LODO

EFECTO DE LA EXCENTRICIDAD DE LA TUBERIA FLUIDO BINGHAM



$$v_2 > v_1$$

$$N_{Re2} > N_{Re1}$$

$$T_{w2} > T_{w1}$$

Si $T_w > T_f$, EXISTE FLUJO

Fig. 8

REMOCION
DEL LODO

ESFUERZO DE CORTE - FLUIDO BINGHAM

En Flujo Laminar

Esfuerzo de corte en la pared

$$\tau_{w1} = \frac{\Delta P \cdot D_1}{4 \cdot L}$$

$$\tau_{w2} = \frac{\Delta P \cdot D_2}{4 \cdot L}$$

Si $D_2 = 2D_1$

$$\tau_{w2} = 2 \cdot \tau_{w1}$$

Mientras $T_{w1} \leq T_y$ no habrá flujo en la tubería 1

Fig. 9

REMOCION DEL LODO

POSIBILIDADES DE FLUJO - FLUIDO BINGHAM

	Laminar		Turbulento
No flujo			
	Laminar	Laminar	Turbulento
Incrementando el Caudal			
$V_2 > V_1$	$V_2 > V_1$	$V_2 > V_1$	$V_2 > V_1$
$T_{w2} > T_y > T_{w1}$	$T_{w2} > T_{w1} > T_y$	$T_{w2} > T_{w1} > T_y$	$T_{w2} > T_{w1} > T_y$
		$N_{Re2} > N_{Re1} > N_{Re,Crit}$	$N_{Re2} > N_{Re1} > N_{Re,Crit}$
		$N_{Re,Crit} > N_{Re,Crit}$	

Fig. 10

REMOCION DEL LODO

EFECTO DE LA REDUCCION DEL STO FLUIDO BINGHAM

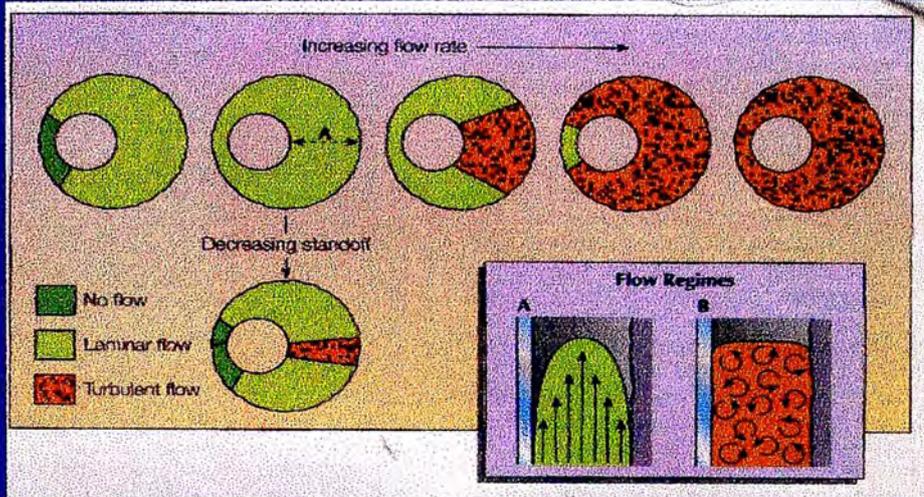


Fig. 11

**REMOCION
DEL LODO**

EFECTO DE LA ROTACION DE LA TUBERIA DURANTE LA COLOCACION DEL CEMENTO

TUBERIA ESTACIONARIA

COMIENZO DE LA
ROTACION

LODO CASI REMOVIDO

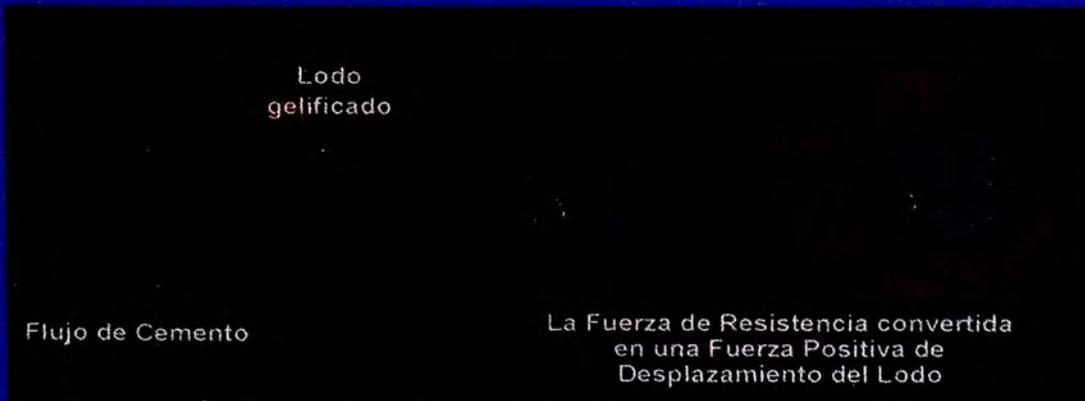


Fig. 12

**REMOCION
DEL LODO**

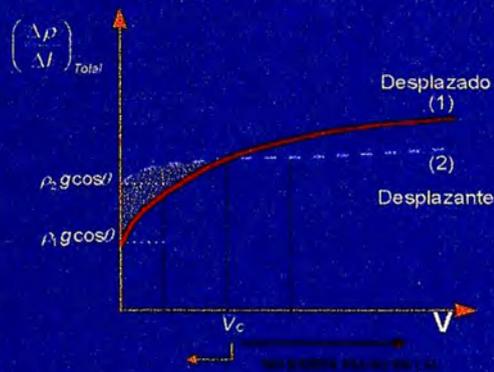
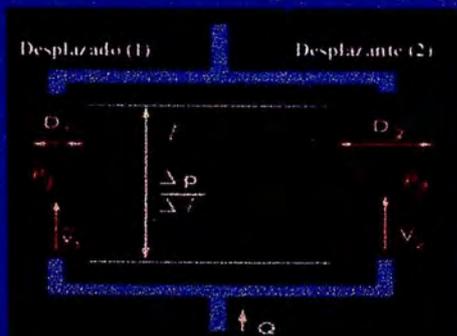
PERFIL DE VELOCIDAD EN UN ANULAR EXCENTRICO FLUIDO BINGHAM



Fig. 13

REMOCION
DEL LODO

TECNICA DE FLUJO LAMINAR EFECTIVO CRITERIO DE VELOCIDAD DIFERENCIAL



PARA EVITAR EL "BYPASEO" DEL FLUIDO DESPLAZADO EN LA PARTE ANGOSTA POR EL FLUIDO DESPLAZANTE EN LA PARTE ANCHA, v_2 NO DEBE EXCEDER v_1 .

SIEMPRE $v_2 > v_1$

$$(dP/dL)_{Total} = \rho_1 g \cos \theta + (dP/dL)_{fricción 1}$$

$$(dP/dL)_{fricción 1} > (dP/dL)_{fricción 2}$$

Fig. 14

REMOSION
DEL LODO

2.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCION DE LAVADORES, ESPACIADORES Y MEZCLAS DE CEMENTO

2.2.1 GRADIENTES PORALES Y DE FRACTURA

Presión Poral

La presión poral durante la perforación puede ser definida como la presión hidrostática requerida para evitar que los fluidos (líquidos o gas) fluyan dentro del pozo. En formaciones normalmente presurizadas esta se aproxima a la presión del agua que ocupa los espacios porosos en la matriz de la roca. Normalmente 8.32- 9.0 ppg. Sin embargo es muy frecuente encontrar presiones anormales en zonas de intenso fallamiento.

Los datos de presión poral tienen una gran utilidad para la perforación y cementación del pozo, sin embargo las medidas directas de esta son costosas, y solo son posibles después del baleo de la formación mediante pruebas para evaluar el potencial de estas zonas y la evaluación de registros (sonicos, eléctricos). En pozos de desarrollo, los primeros estimados de la presión poral están basados en correlaciones de información de pozos cercanos y datos sísmicos (velocidad acústica).

Las presiones porales en todo el intervalo a ser cementado, pueden ser estimadas de la densidad del lodo a esas profundidades. Una vez que son conocidas pueden ser usadas para determinar la mínima presión hidrostática que se debe ejercer durante el trabajo de cementación, las densidades de las lechadas, volúmenes de lavador químico, espaciador, etc.

Para efectos del diseño se debe considerar la máxima presión poral. La situación más peligrosa para el control del pozo ocurrirá cuando el fluido de menor densidad (comúnmente agua, lavador) pasa en frente de esta zona activa. Dependiendo de la configuración del anular (ó diámetro del pozo) encima, se reduce o incrementa el impacto de un fluido de baja densidad en el neto de presión hidrostática. Si no hay ninguna zona anormalmente presurizada entonces lo mejor es seleccionar la zona activa más somera en la cual se presenta el mayor riesgo de descontrol del pozo, ignorando cualquier efecto de presión por fricción. Esto nos dará el peor escenario en el cual basar el diseño del trabajo.

Presión de Fractura

Para que un fluido pueda entrar en el espacio poroso, su presión debe exceder la presión poral de la formación. A medida que esta presión se sigue incrementando, la matriz de la roca empieza su proceso de compresión. La compresión es mayor en la dirección del mínimo esfuerzo, cuando la presión del fluido excede la suma de la presión poral y el mínimo esfuerzo de la matriz se produce el rompimiento de la roca y la propagación de la fractura, teniendo generalmente una orientación perpendicular al mínimo esfuerzo.

La presión de fractura indica la presión con la que se rompe la formación a una determinada profundidad y es comúnmente mayor que la presión para mantener la inyección. Las presiones de fractura pueden ser determinadas de las pruebas de integridad de la formación, pruebas de circulación con la tubería en el fondo, experiencia local, o récords de los trabajos de estimulación ("Presión standing"). También se pueden considerar las ecuaciones en las cuales se toma en cuenta la presión litostática, la presión poral, el factor de Poisson y la profundidad.

En un pozo horizontal se debe tomar en cuenta que el gradiente de fractura dependerá de la orientación e inclinación del pozo, no será necesariamente el mismo valor que para un pozo vertical en la misma área.

Una vez que el gradiente de fractura ha sido establecido, es usado para determinar la densidad máxima del cemento y/o altura, equipo adicional para cementación (collar de etapas, canastas, etc.), límites de presión, régimen de desplazamiento, y selección de lavador y/o espaciador.

El trabajo de cementación debe ser realizado sin fracturar la formación y/o inducir pérdidas excediendo la presión poral en todo momento. Para efectos de diseño, la zona de mínimo gradiente de fractura debe ser siempre considerada. Las zonas más débiles experimentarán la máxima presión justo antes que el tapón superior haya llegado al collar flotador cuando la columna mas larga y de mayor peso esté en el anular y la presión por fricción sea mayor. Puede ser necesario reducir la densidad del cemento o el volumen del mismo, incrementar el volumen de lavador, reducir el caudal de desplazamiento, el uso de mezclas de cemento especiales (tixotrópicas), o el uso de collares de varias etapas. A medida que la presión de fractura es más cercana a la presión poral, el diseño se torna mas complicado.

2.2.2 INTERACCIONES CEMENTO - FORMACION

2.2.2.1 PERDIDA DE CIRCULACION

La pérdida de circulación esta definida como la pérdida total o parcial de fluido de perforación o mezcla de cemento en zonas altamente permeables, formaciones cavernosas, fracturas naturales ó inducidas ya sea durante el proceso de perforación o el de cementación. La pérdida de circulación puede ocurrir en formaciones con porosidad primaria y secundaria, y no debe ser confundida con la pérdida de filtrado que está mas relacionada con la porosidad primaria.

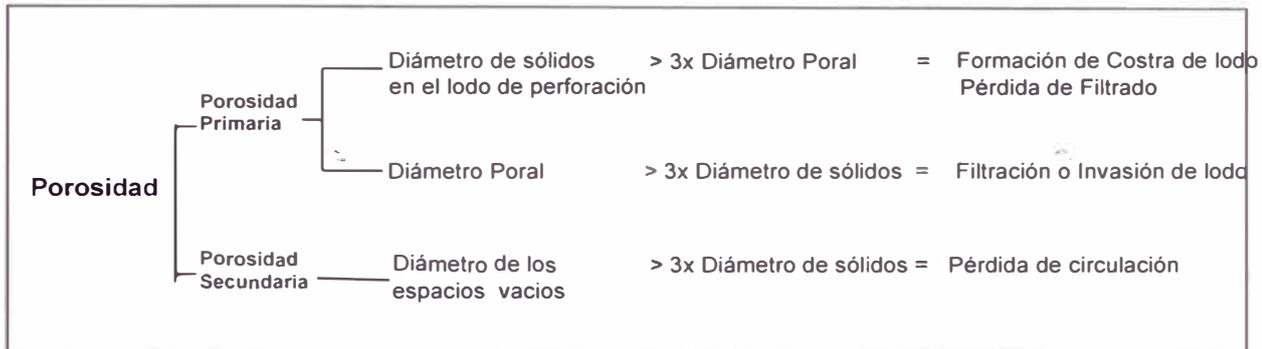


Figura 15

Consecuencias de una Pérdida de Circulación

- Posible reventón debido a la pérdida de nivel de lodo en el pozo
- Posibilidad de atascos de la tubería de perforación debido a una pobre remoción de los recortes
- Pérdida de aislamiento zonal debido a un insuficiente llenado de cemento
- Daño irreparable a la formación productiva
- Pérdida del pozo

Para resolver un problema de pérdida de circulación con la técnica apropiada para cada caso, es necesario determinar la zona con la mayor precisión posible, conocer su severidad, características de la zona, la historia de la perforación o experiencias previas en el campo y además conseguir la información necesaria para simular las presiones durante el trabajo de cementación.

Clasificación de las zonas de Pérdida de Circulación

La severidad de las zonas de pérdida puede ser clasificada en la siguiente tabla:

Tipó de Pérdida	Severidad
Filtración (menor)	< 10 bbl /hr
Parcial (media)	10 - 500 bbl/ hr
Completa (severa)	Total, imposible mantener el pozo lleno

Además es común clasificar el tipo de zona de pérdida de circulación en cuatro categorías:

- Formaciones no consolidadas o de alta permeabilidad
- Fracturas naturales o fisuras
- Fracturas horizontales o verticales inducidas
- Formaciones vugulares o cavernosas

Las pérdidas por filtración referidas en la Figura 15, pueden ocurrir en cualquiera de estos cuatro tipos de zonas de pérdida de circulación. Las pérdidas parciales frecuentemente ocurren en gravas altamente permeables, pequeñas fracturas naturales, o como resultado de la iniciación de una fractura. Las pérdidas completas están relacionadas con extensas zonas de grava, grandes fracturas naturales o inducidas o formaciones cavernosas.

La siguiente tabla es un resumen de algunas características asociadas a cada tipo de zona de Pérdida de Circulación.

Zonas altamente permeables	Fracturas naturales	Fracturas inducidas	Zonas Cavernosas
Arenas porosas o gravas	Pueden ocurrir en cualquier tipo de roca	Pueden ocurrir en cualquier tipo de roca	Normalmente limitado a formaciones de dolomitas y limolitas(Carbonatos)
Profundidades someras	Cualquier profundidad	Cualquier profundidad: comúnmente < 2000 ft para fracturas horizontales >2000 ft para fracturas verticales	Profundidades someras
Pérdida gradual de nivel en los tanques de lodo	Pérdida gradual de nivel en los tanques de lodo	Normalmente la pérdida es repentina y acompañada por una pérdida completa del retorno	La pérdida del retorno puede ser repentina y completa
Si se continúa la perforación, entonces las pérdidas pueden ser completas	Si se continúa la perforación, y más fracturas son expuestas, entonces se puede experimentar pérdidas completas	La pérdida puede seguir a una presión de pistoneo o un viaje de tubería. Cuando ocurre una pérdida de circulación y en los pozos adyacentes no se tiene este antecedente, se puede esperar fracturas inducidas	La perforación suele ser muy difícil antes de la pérdida

Pérdida de Circulación durante la Cementación

Antes de comenzar un trabajo de cementación las pérdidas deben haber sido eliminadas o reducidas significativamente durante la etapa de perforación. Si esto no es posible y se anticipan pérdidas durante la cementación, existen dos opciones:

- La primera es mantener las presiones en el fondo debajo de la máxima densidad equivalente del lodo. Las presiones ejercidas en el fondo también pueden ser reducidas usando aditamentos mecánicos como collares de etapas, canastas, ECP, etc.
- La segunda opción es bombear un material de taponeo delante de la mezcla de cemento, añadir material de control de pérdida a la mezcla de cemento mismo, o usar aditivos especiales que impartan propiedades tixotrópicas a la mezcla de cemento.

Sistemas para controlar una Pérdida de Circulación

Los siguientes sistemas son usados para controlar una pérdida de circulación:

Zona de Pérdida Tipos	Severidad	Sistema Propuesto
Altamente Permeable	Pérdidas parciales	<ul style="list-style-type: none"> • Gel permanente • Tapón a base de diesel - cemento • Tapón a base de polímeros
	Pérdidas totales	<ul style="list-style-type: none"> • Gel permanente • Lavador a base de silicatos y cemento • Mezclas de cemento extendidas
Zonas Cavernosas	Pérdidas parciales	<ul style="list-style-type: none"> • Gel permanente • Mezclas tixotrópicas de cemento • Tapón a base de polímeros
	Pérdidas totales	<ul style="list-style-type: none"> • Mezclas de cemento espumado • Mezclas tixotrópicas de cemento • Cemento ultra liviano • Mezcla de cemento de fragüe inmediato
Zonas Fracturadas	Pérdidas parciales	<ul style="list-style-type: none"> • Tapón a base de polímeros & cemento • Gel permanente • Mezclas tixotrópicas de cemento • Cemento con material de pérdida • Cemento ultra liviano • Mezcla de cemento de fragüe inmediato
	Pérdidas totales	<ul style="list-style-type: none"> • Tapón a base de polímeros • Gel permanente • Mezclas tixotrópicas de cemento • Cemento ultra liviano • Lavador a base de silicatos y cemento • Tapón a base de polímeros & cemento

En los últimos 4 años, en las operaciones en Talara los sistemas más usados son:

Lavadores

Pueden ser soluciones a base de silicatos que al contactar soluciones de calcio forman un gel semi-permanente que permite reducir las pérdidas de fluido durante la colocación del cemento. Estas soluciones pueden formar también un sello permanente en contacto con el cemento.

Materiales de control de pérdida de circulación para mezclas de cemento

El uso de este tipo de materiales en el cemento esta limitado a pérdidas menores o parciales en formaciones altamente permeables y no para resolver pérdidas de circulación totales en formaciones naturalmente fracturadas o formaciones cavernosas. Cuando se usa material de pérdida de circulación en el cemento se debe tener cuidado que este material sea inerte y no afecte la composición del cemento. El tamaño y la concentración deben ser seleccionados para evitar un problema de mezclado y el taponamiento del equipo de flotación. Los materiales más comunes son del tipo granular(gilsonita, etc.) diseñados para taponear la cara de la formación ya que el material fibroso puede taponear el equipo de mezclado.

Sistemas tixótropicos de Cemento

La propiedad de autoaporte de una mezcla de cemento tixotrópica es muy útil a través de formaciones con bajo gradiente de fractura. Las mezclas tixotrópicas no ejercen toda la presión hidrostática de la columna porque parte de la presión es transmitida a la cara de la formación y a las paredes de la tubería.

2.2.2.2 MIGRACION DE GAS

El proceso de migración de gas es una serie de fenómenos físicos complejos que involucran cambios constantes en la presión, saturación de fluidos, y una matriz en proceso de evolución. Además las heterogeneidades dentro del cemento, o los efectos de frontera en la tubería o en la formación pueden inducir también una entrada de gas no uniforme. Por lo tanto no es posible predecir la migración de gas con absoluta seguridad.

En la Figura 16 se identifican algunos de los parámetros que contribuyen a la migración del gas durante una cementación:

- Una densidad incorrecta puede producir un desbalance de la presión
- Una mala remoción del lodo y de su costra deja una ruta para la migración del gas a través del ánulo
- La gelificación prematura conduce a una pérdida de presión hidrostática
- Una excesiva pérdida de filtrado deja espacio para la migración de gas
- Una permeabilidad excesiva de la mezcla de cemento resultará en un mal aislamiento zonal y poca resistencia al flujo de gas
- Un alto encogimiento del cemento generará el incremento de la porosidad y los esfuerzos en el cemento y finalmente puede producir la formación de un microánulo
- Una falla del cemento frente a un esfuerzo o tensión ayuda a que el gas fracture el cemento
- Una mala adherencia del cemento a la tubería o a la formación también favorece la migración de gas.

A pesar de haber distintos mecanismos para la migración del gas en el anular, los prerequisites para que este fenómeno se produzca son similares. Debe haber una fuerza que inicie el flujo de gas, y un espacio dentro del ánulo cementado para que el gas pueda ocuparlo. La fuerza se presenta cuando la presión en el anular adyacente a la zona de gas cae por debajo de la presión del gas de la formación.

Para evaluar la posibilidad de controlar una migración de gas, se tiene que tener en cuenta cuatro parámetros:

- Formación
- Remoción del lodo
- Evolución de la presión en el anular después de la colocación del cemento
- Comportamiento de la mezcla de cemento

Formación

El proceso de análisis comienza con la identificación de todas las zonas posibles de migración de gas. Cada zona debe ser caracterizada por su posición, extensión vertical, presión y permeabilidad. Una descripción mas o menos exacta es necesaria para optimizar los parámetros hidrostáticos.

Además de identificar las zonas de gas es necesario tener una buena descripción de la presión de fractura y presión poral de otras capas permeables. Un gradiente de fractura bajo reduce la presión de sobrebalance para controlar el pozo, y la presencia de zonas depletadas pueden empeorar mas el problema ya que favorece el flujo cruzado y la pérdida de filtrado, lo cual a su vez acelera la reducción de la presión en el anular.

Durante la colocación del cemento, la densidad de la mezcla controla la fuerza que inicia el flujo de gas. El gas puede invadir y migrar a través del cemento sólo si la presión de la formación es mayor que la presión hidrostática en la cara de la formación. Por lo tanto como primer requerimiento la densidad de la mezcla de cemento debe estar correctamente diseñada para prevenir el flujo de gas y evitar un problema de pérdida de circulación o fractura. El efecto de caída libre debe ser considerado para la simulación de las presiones.

Los errores en la densidad del cemento durante su mezclado en superficie pueden acarrear problemas muy críticos en las propiedades finales de la mezcla de cemento (reología, tiempo de fragüe). Un mezclado inconsistente también resulta en la colocación de una columna de cemento no uniforme que puede traer problemas de depositación de sólidos, desarrollo de agua libre y/o taponamiento prematuro de algunas partes del ánulo.

Remoción del lodo

La primera preocupación cuando se cementa a través de una zona de gas es alcanzar una óptima remoción del lodo. Una presión diferencial suficiente aplicada a través de los canales de lodo y/o el revoque de lodo deshidratado producto de una mala remoción puede ser el comienzo de una migración de gas.

Para efectos prácticos, se debe tratar de alcanzar un buen aislamiento zonal tanto en la zona de gas como en una sección de 600 ft encima de esta. Con el fin de optimizar la remoción del lodo, se deben considerar los siguientes parámetros:

- **Eficiencia de la circulación del lodo**

Durante el acondicionamiento del lodo previo a la cementación, es necesario alcanzar el Q_{min} para tener Flujo Laminar Efectivo(FLE) en todo el anular excéntrico, y se debe circular por lo menos un volumen de hueco.

- **Tiempo de Contacto a través de la zona de interés (> 10min)**

- **Volumen Efectivo a través de la zona de interés**

Se recomienda un Volumen Efectivo de 60 bbl para el espaciador

- **Volumen Efectivo de cemento para desplazar el espaciador**

Tanto el desplazamiento lodo-espaciador como el espaciador-cemento debe ser realizados en Flujo Laminar Efectivo. Se recomienda como Volumen Efectivo de cemento el requerido para cubrir hasta 600 ft encima de la zona de gas.

- **Movimiento de la tubería**

Tanto la rotación como la reciprocación contribuyen a la movilización del lodo.

- **Numero de tapones de fondo**

Es muy importante reducir la contaminación de los fluidos durante su desplazamiento dentro de la tubería ya que si se produce una contaminación entre el cemento y el lodo, la nueva mezcla tiende a gelificar reduciendo prematuramente la presión hidrostática en el anular y además necesita un mayor tiempo de fraguado favoreciendo así la migración de gas.

- **Compatibilidad de fluidos**

Evolución de la presión en el anular después de la colocación del cemento

Luego de la colocación de la mezcla de cemento en el anular, el gas puede entrar a través de distintos mecanismos de acuerdo a la evolución del estado del cemento, las presiones que se experimentan y otros factores del pozo. La mezcla de cemento comienza como una suspensión granular densa que transmite completamente la presión hidrostática, luego a medida que esta se gelifica, se forma un material de dos fases (una red sólida con fluido en los espacios porosos), y

finalmente durante el proceso de fraguado se alcanza un punto en el cual el cemento es un sólido impermeable.

- **Estado 1 del cemento.- Fluido granular denso**

Cuando se para el bombeo, la mezcla de cemento en el anular es un fluido granular denso que transmite la presión hidrostática. Si la presión poral de la formación no es mayor que la hidrostática, el gas no puede invadir. Sin embargo, la presión en el anular comienza a caer por una combinación de fenómenos: gelación, pérdida de filtrado y encogimiento del cemento.

A medida que el cemento fragua, el esfuerzo de gel estático se incrementa continuamente de acuerdo a la naturaleza de la mezcla de cemento. Hay un riesgo potencial de invasión del gas una vez que la presión en el anular cae debajo de la presión del gas en la formación. Aun con la presencia de un revoque de lodo entre la formación y el cemento, un diferencial de menos de 1 psi permite que el gas pueda comenzar la invasión. Esto explica la fuerza que produce la invasión del gas, sin embargo, debe existir espacio libre en el anular para que el gas pueda ocuparlo. Este espacio es proporcionado por el encogimiento, el cual ocurre debido a que la fase hidratada generalmente es menor que la de los productos reactantes iniciales.

El gas puede entrar y fluir a través de la porosidad de la estructura en gelificación sin modificarla- Micropercolación o moverse modificando la estructura de gel en forma de burbujas, bolsas alargadas, canales a través de las interfaces cemento-formación ó cemento-tubería o en forma de plumas ascendentes si el gas permanece conectado a la fuente de influjo (Figura 17).

- **Estado 2 del cemento.- Un material de dos fases**

Una vez que la columna de cemento se puede autosoportar completamente, se puede considerar que actúa como una matriz de partículas sólidas interconectadas conteniendo una fase fluida. El proceso de fraguado continua y la hidratación se acelera. La presión, ahora presión poral, disminuye mas a medida que la hidratación del cemento consume el agua de mezcla. Esto conlleva a una reducción de volumen o encogimiento de la matriz interna de hasta 6 %, lo cual produce esfuerzos de tensión tangencial en el ánulo que a su vez ayudan a la iniciación de fracturas (porosidad secundaria en el cemento) y la ruptura de la adherencia entre el cemento-tubería y cemento-formación. Tanto la reducción de agua como el encogimiento disminuyen grandemente la presión hidrostática que el cemento ejerce en la formación.

Hay dos mecanismos diferentes esenciales para la invasión del gas en esta etapa, dependiendo del esfuerzo de la estructura sólida y la facilidad con la que el fluido puede ser forzado a través de los poros del cemento por la invasión del gas. En la etapa temprana del proceso de fraguado,

mientras el cemento tiene una estructura sólida débil, la posibilidad de crear "dedos viscosos" (bolsas elongadas) y fracturas viscoelásticas se mantiene. Mas tarde, la estructura sólida llega a ser suficientemente rígida y fuerte para contrarrestar este efecto, y la invasión del gas y subsecuente flujo esta limitado por la permeabilidad de la red sólida a los fluidos porales.

Una vez que el gas ha invadido la estructura poral del cemento, este se puede elevar debido a las fuerzas de flotación. Por otra parte, si el gas continúa conectado a través del espacio poral del cemento con la formación de gas, esta presión mayor puede forzar el gas mas lejos dentro del ánulo. Si la presión del gas es mayor que el mínimo esfuerzo de compresión en el cemento y la permeabilidad es demasiado baja para permitir un flujo significativo, entonces el cemento se puede fracturar. Sin embargo, esto es probable que ocurra sólo donde se tienen esfuerzos de tensión residuales en el ánulo suficientemente grandes para permitir que las grietas se abran bajo la influencia de la presión del gas.

- **Estado 3 del cemento.- Un sólido elástico**

Una vez que la hidratación se completa, el cemento llega a ser un material elástico y quebradizo, que es homogéneo y esencialmente impermeable. En la mayoría de los casos el gas no puede migrar dentro de la matriz de cemento y puede fluir solo a través de canales interfaciales cemento-tubería o cemento-formación si se ha desarrollado un microanulus, o donde hay una falla mecánica del cemento.

Comportamiento de la mezcla de cemento

La resistencia al gas depende de la composición de la mezcla de cemento. Dos parámetros son importantes para evaluar su comportamiento: el tiempo de transición y la pérdida de filtrado.

La velocidad de disminución de la permeabilidad de la mezcla de cemento es difícil de medir, pero es posible correlacionarla con la velocidad de cambio de consistencia (tiempo de transición). Un tiempo de transición prolongado en una prueba de bombeabilidad no es conveniente en estos casos(Figura 18-B).

Durante la hidratación del cemento, la pérdida de fluido a las formaciones circundantes es una causa principal de reducción de la presión poral. Bajo condiciones estáticas que siguen al emplazamiento, un descontrolado filtrado en la mezcla de cemento hacia la formación contribuye a una reducción en el volumen. Esto reduce la presión a través de la columna de cemento y permite un espacio para que el gas pueda entrar. Por lo tanto el control del filtrado es esencial.

Adicionalmente es importante tener una mezcla de cemento de cero agua libre particularmente en pozos altamente desviados ya que las partículas tienden a sedimentarse en la parte baja, y un canal continuo de agua se puede formar en la parte superior creando un camino para la migración del gas.

Sistemas de cemento disponibles para controlar una Migración de Gas

Cementos de fragüe inmediato

Son mezclas de cemento bien dispersadas que no muestran una gelación progresiva sino que fragúan de inmediato. Antes del fragüe estas mantienen el total de la presión hidrostática sobre la zona de gas y desarrollan rápidamente una matriz de baja permeabilidad para prevenir significativamente la migración del gas. Estos sistemas son difíciles de diseñar ya que varían mucho con la temperatura. Ver Figura 18-A.

Cementos Compresibles

Estos cementos son usados para mantener la presión poral del cemento encima de la presión del gas de la formación. Entre estos tenemos: Cementos espumados y sistemas de generación de gas In-situ.

Los cementos espumados trabajan expandiéndose para ocupar la reducción de volumen en la mezcla de cemento debido a la pérdida de filtrado o la contracción química. Esta expansión mantiene una mayor presión poral que en el caso de cementos incompresibles. Este sistema está limitado por la profundidad ya que necesitara más gas del disponible para compensar la contracción química.

Los sistemas de generación in-situ están diseñados para mantener la presión poral del cemento a través de reacciones químicas que producen gas en profundidad. Este puede ser hidrógeno o nitrógeno. Las principales limitaciones de este sistema aparte de las relacionadas con seguridad, están en la incapacidad del gas a una presión típica de fondo de poder alcanzar una expansión volumétrica de 4-6% necesaria para mantener la presión poral.

Cementos Tixotrópicos

Durante el estado 1 del cemento- Fluido granular denso-, el cemento es una suspensión líquida, las burbujas de gas pueden moverse dentro de la columna de cemento solo si el esfuerzo de cedencia del cemento se mantiene debajo de un valor crítico. Diseñar una mezcla de cemento con un rápido incremento del esfuerzo de gel ayuda a atrapar el gas antes que se eleve en forma de burbujas, previniendo la comunicación entre zonas o el flujo de gas a superficie. La presión hidrostática

transmitida por los cementos tixotrópicos debería revertirse a la gradiente del agua intersticial y mantenerse así hasta que el periodo de fragüe se inicie. Sin embargo la presión hidrostática puede comenzar a disminuir y el gas puede comenzar a entrar por otro mecanismo.

Cementos impermeables

La migración del gas puede ser prevenida reduciendo la permeabilidad de la mezcla de cemento durante la transición crítica de líquido a sólido. Existen dos aproximaciones para alcanzar esto: la primera es disminuir el movimiento en el espacio poral, y la segunda sellar el espacio poral.

El uso de polímeros solubles, que viscosifican el agua intersticial y reducen la permeabilidad dentro del cemento cae en la primera categoría. Desde que por lo menos parte de la migración del gas involucra un desplazamiento del fluido en el espacio poral, esta viscosificación puede limitar la movilidad del gas. Desafortunadamente este proceso tiende a afectar la reología de la mezcla de cemento, haciéndola más viscosa y elevando la presión de desplazamiento. Además está limitado a aplicaciones de baja temperatura para no afectar la eficiencia de los viscosificantes.

La segunda estrategia, la de reducir los espacios en la matriz de cemento impidiendo la entrada de burbujas de gas ha sido la más efectiva. En la Figura 19 se muestra el efecto de las partículas de látex en el cemento.

Cementos Resistentes

Las propiedades del cemento fraguado pueden ser modificadas por el uso de aditivos. Los cementos con latex reducen el encogimiento durante la hidratación del cemento, incrementan el esfuerzo de tensión para resistir a la iniciación y/o propagación de fracturas y además mejoran la adherencia a la tubería y a la formación.

PARAMETROS QUE CONTRIBUYEN A LA MIGRACION DE GAS

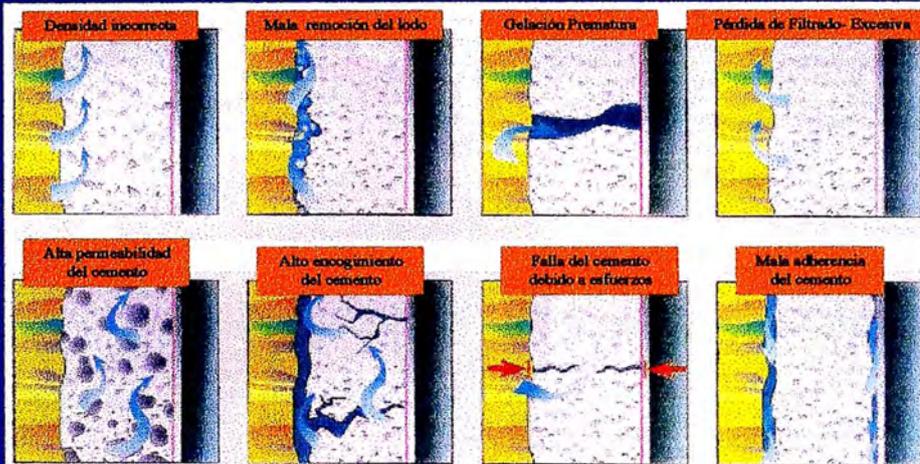


Fig. 16

MIGRACION DE GAS

FORMAS DE MIGRACION EN UN FLUIDO VISCOELASTICO

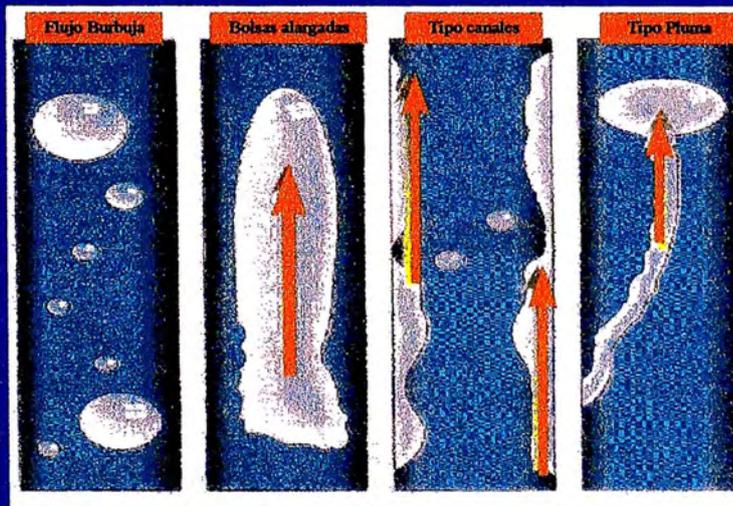


Fig. 17

MIGRACION DE GAS

TIEMPO DE BOMBEABILIDAD (Tiempo de Transición)

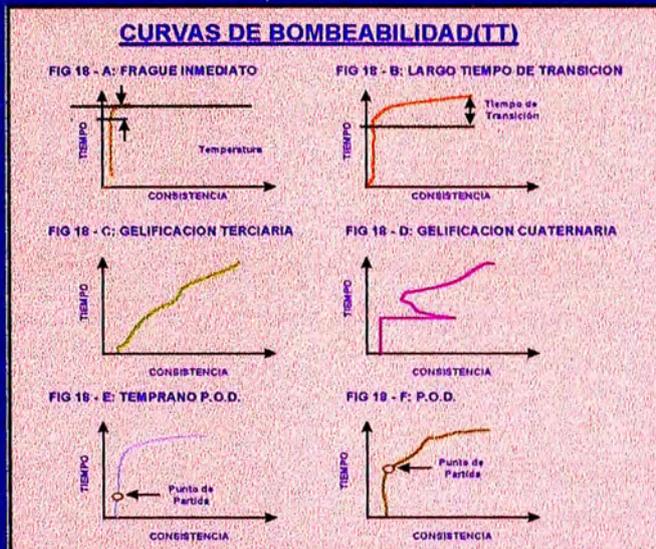
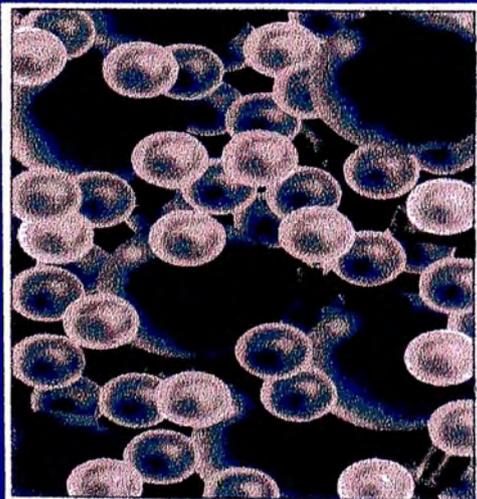


Fig. 18

**MIGRACION
DE GAS**

PARTICULAS DE LATEX EN EL CEMENTO



MECANISMO DE BLOQUEO DEL LATEX

- REDUCCION DE LA PERMEABILIDAD
- REDUCCION DE LA POROSIDAD
- MEJORA EL CONTROL DE FILTRADO
- LIMITA LA MIGRACION DEL GAS

Fig. 19

**MIGRACION
DE GAS**

2.3 GUIA PARA LA SELECCION DE LAVADORES, ESPACIADORES Y MEZCLAS DE CEMENTO

2.3.1 DISEÑO DE LAVADORES Y ESPACIADORES

En un trabajo de cementación se necesita un completo desplazamiento del lodo por la mezcla de cemento. El contacto de estos dos fluidos puede resultar en una masa viscosa en la interface ya que frecuentemente son incompatibles. Cuando se produce esta gelación del lodo la mezcla del cemento tiende a canalizarse o bypassar el lodo viscoso y/o crea altos caudales de bombeo que pueden fracturar las formaciones débiles. Los Lavadores y Espaciadores están diseñados para separar el lodo y el cemento, deben ser compatibles con ambos fluidos, desplazar el lodo de perforación y mantener el control hidrostático del pozo durante toda la operación.

Lavadores

Son fluidos con una viscosidad y densidad cercana a la del agua. Barren el lodo móvil y además dispersan y adelgazan el lodo residual dejado en las paredes de la tubería y de la formación. Pueden ser fácilmente bombeados en Flujo Turbulento y algunas veces pueden ser acompañados por un espaciador con el fin de remover los recortes remanentes.

Aditivos

Solvente	Remueven la película de aceite de la tubería y/o formación
Surfactantes	Dispersan el lodo y además dejan la tubería mojada al agua

Espaciadores

Son fluidos de alta densidad. Su uso es recomendado cuando los Lavadores generan problemas de control del pozo. Un buen espaciador debe tener las siguientes propiedades:

- **Densidad y Reología controlada**

Los espaciadores son mas eficientes en Flujo Turbulento debido al efecto de erosión de las partículas del fluido, sin embargo su densidad y viscosidad deben ser optimizadas para minimizar el Q_{crit} , sin comprometer la suspensión del agente de peso a las temperatura de fondo requeridas.

En los espaciadores para Flujo Laminar Efectivo, la densidad y la viscosidad son ajustables con el fin de satisfacer los criterios de Diferencial de densidades y Diferencial de Presión por Fricción. Una optima remoción del lodo es alcanzada cuando la densidad del espaciador es mayor que la del lodo y menor que la del cemento.

- **Estabilidad (no sedimentación o agua libre)**

Es importante que no exista sedimentación del agente de peso del espaciador, ya que una deposición excesiva puede traer problemas de succión en las bombas, pérdida de hidrostática, y cambio de reología que compromete finalmente los caudales de diseño.

- **Buen Control de Filtrado**

Requerido para mantener las propiedades del espaciador durante todo el trabajo

- **Compatibilidad con los demás fluidos (lodo, cemento)**

Cualquier mezcla formada en la interface de los fluidos debe tener menor viscosidad que el fluido desplazante(espaciador, cemento) y los esfuerzos de gel deben ser relativamente bajos o fáciles de romper.

- **Ambientalmente seguro y fácil de ser preparado en el campo**

Aditivos

Viscosificantes	Suspenden los agentes de peso y controlan las propiedades reológicas
Dispersantes	Mejoran la compatibilidad Espaciador- Lodo- Mezcla de cemento
Surfactantes	Adelgazan y dispersan el lodo y dejan la tubería mojada al agua
Controladores de filtrado	

Mezclas de cemento de limpieza

Son mezclas de cemento diluidas(10-13 ppg) que tienen baja viscosidad. Es una opción relativamente económica a cambio de los Lavadores y Espaciadores. Su mecanismo de remoción del lodo se basa en la turbulencia y el efecto abrasivo de las partículas sólidas del cemento. Sin embargo presenta diversos inconvenientes:

- Tendencia a sedimentar
- Imposible ajustar su reología
- Elevada pérdida de filtrado, lo cual genera una gelificación de la mezcla y modifica totalmente su capacidad de abrasión y remoción de sólidos
- Incompatibilidad entre el lodo y la mezcla de cemento de limpieza
- Difícil de ser premezclada

2.3.2 DISEÑO DE MEZCLAS DE CEMENTO - ADITIVOS

Las mezclas de cemento son diseñadas para proporcionar un aislamiento hidráulico en las zonas de interés, mantener un control de las presiones durante y después de la colocación del cemento, y tener propiedades que permitan proteger y soportar la tubería cuando el cemento este fraguado. Estos requerimientos son un balance de las siguientes consideraciones:

- Propiedades de la mezcla de cemento (densidad, reología, pérdida de filtrado, estabilidad, tiempo de bombeo)
- Propiedades del cemento fraguado (desarrollo del esfuerzo compresivo, permeabilidad y esfuerzo de adherencia).
- Consideraciones económicas (rendimiento de la mezcla de cemento, aditivos, equipos)
- Disponibilidad de cemento y aditivos

La selección de la mezcla empieza con la selección del tipo de cemento, este se hace de acuerdo a los requerimientos para cada caso específico, pero mayormente la disponibilidad es la que determina la selección. Las clases de cemento API disponibles y sus aplicaciones generales se pueden resumir en la siguiente tabla:

Clase de Cemento API	Resistencia a los sulfatos(*)	Principales aplicaciones
A	O ^a	Tuberías superficiales
B	MSR ^b , HSR ^c	Menos consistente que la clase G ò H
C	O, MSR, HSR	Alto esfuerzo compresivo inicial
G	MSR, HSR	Más consistente que el clase B con aditivos su limite de temperatura es 800 °F
H	MSR, HSR	Idéntico en composición que el clase G Grano más grande

^aOrdinario, no es recomendable cuando se necesita resistencia a los sulfatos

^bModerada resistencia a los sulfatos

^cAlta resistencia a los sulfatos

(*) La resistencia a los sulfatos es importante ya que el agua encontrada en subsuelo generalmente contiene sulfatos de sodio y magnesio, los cuales pueden reaccionar con algunos productos resultantes de la hidratación del cemento. Estos a su vez pueden generar una expansión descontrolada del cemento originando la pérdida de esfuerzo compresivo, ruptura y daño de la tubería.

Una vez seleccionado el tipo de cemento, los siguientes pasos representan una secuencia lógica para la selección de la mezcla y sus aditivos.

1. El "análisis del pozo" (sección 2.2) determina los criterios principales para la selección de la mezcla de cemento y de sus aditivos:
 - Rango de densidades
 - Control de filtrado
 - Mínimo esfuerzo compresivo
 - Potencialidad de pérdidas de circulación y/o entrada de gas("Mezclas especiales")
 - Pozo altamente desviado u Horizontal

2. La selección de aditivos debe ser de acuerdo a la temperatura de aplicación y las restricciones que involucra el uso de "mezclas especiales"
 - La selección de extendedores puede ser hecha en base a un análisis económico de acuerdo a las condiciones del pozo, disponibilidad y facilidad del diseño.
 - El aditivo de pérdida de filtrado debe viscosificar la mezcla en el caso de FLE y debe ser el menos viscosificante en el caso de Flujo Turbulento.
 - El Dispersante debe ser adecuado al tipo de cemento (fácil de dispersar o difícil de dispersar)
 - Tanto el acelerador, retardador, antiespumante, anti-sedimentante al igual que los demás aditivos deben ser compatibles entre sí

3. Una vez seleccionados los aditivos, se genera una base de datos con las pruebas de laboratorio para una determinada mezcla de cemento. Ingresando la reología de una mezcla de cemento, la geometría del pozo y el STO y se puede determinar los caudales Q_{crit} , Q_{min} y Q_{max} en el CEMCADE y seleccionar finalmente el Régimen de Flujo mas apropiado, Flujo Turbulento o Flujo Laminar Efectivo

4. Selección final de aditivos basado en el diseño del CEMCADE y datos de laboratorio
 - Debido a que la respuesta de los aditivos de cementación varia grandemente dependiendo de los diferentes lotes, tiempo, condiciones de almacenamiento, calidad y composición del agua de mezcla, sistema de mezcla(energía de mezcla), orden de mezcla de los aditivos. Es necesario realizar las pruebas de laboratorio usando las muestras del campo, esto permitirá la selección apropiada de los aditivos y sus concentraciones de manera que la mezcla de cemento y sus propiedades cuando este fraguado sean las requeridas para el trabajo.
 - El diseño en el CEMCADE y las pruebas de laboratorio pueden ser un proceso iterativo hasta que la formulación de la mezcla de cemento sea aceptable para las condiciones finales del pozo, cumpliendo los criterios de remoción de lodo para el Régimen de Flujo seleccionado.

2.3.2.1 DISEÑO DE LAS PROPIEDADES DE UNA MEZCLA DE CEMENTO

DENSIDAD

Esta propiedad gobernará el rendimiento y requerimiento de materiales (costo). Todas las propiedades diseñadas del cemento se basan en su densidad. Variaciones de densidad de 0.5 o 1 ppg pueden ser significativas. Generalmente un incremento de la densidad aumentará la reología (PV , T_V), el esfuerzo compresivo, y reducirá el tiempo de bombeabilidad, agua libre y la pérdida de

filtrado. Para evitar este tipo de problemas generados por la variación de la densidad cuando se tienen volúmenes pequeños es recomendable el pre-mezclado ("Liners").

Generalmente dos mezclas de cemento son consideradas para un trabajo de cementación:

Mezcla de cemento principal (TS)

Sus propiedades son superiores a la de una mezcla de relleno. Tienen mayor capacidad para aislar las zonas de interés o zonas problemáticas, proporcionan suficiente soporte a la tubería y un buen esfuerzo compresivo para continuar la perforación. La densidad más común para la TS es 15.8 ppg para cemento clase G y 15.6 ppg para cemento clase A.

La longitud de esta mezcla en el anular puede ser de 200-400 ft de longitud desde el fondo o un 10% de la longitud de la tubería superficial y/o intermedia, o 200-400 ft encima de la zona productiva en el caso de tuberías de producción. Si se va a usar el FLE se debe tener un diferencial de densidad mínimo de 10% entre la mezcla de relleno y esta mezcla principal.

Mezcla de cemento de relleno(LS)

Normalmente es de baja densidad y es usada para cubrir o sellar zonas superiores en el tope de la mezcla de cemento principal, soportar y proteger la tubería. Las propiedades mecánicas no son tan exigentes, de modo que se toma ventaja de su alto rendimiento para reducir el costo total.

Para su diseño se toma en cuenta la longitud de cemento deseado y el máximo ECD. Si se va a usar el FLE se debe tener un diferencial de densidad mínimo de 10% entre el espaciador y esta mezcla de relleno.

REOLOGÍA

La reología del cemento es necesaria para determinar las propiedades de flujo, predicción de las caídas de presión por fricción e identificación de problemas de mezclado e inestabilidad.

La reología requerida dependerá del régimen de desplazamiento. Para una densidad dada, un fluido de bajas características reológicas es requerido para alcanzar el Flujo Turbulento a bajos caudales. Sin embargo no se debe sobredispersar la mezcla ya que se produciría sedimentación. Para el Flujo Laminar Efectivo es necesario una mezcla de cemento relativamente viscosa para asegurar que el criterio de presión por fricción pueda ser cumplido.

La reología es alterada por la densidad, temperatura, el uso de dispersantes y viscosificantes. En base a las lecturas del VG Fann se halla la curva de comportamiento del fluido. Se compara con

los modelos matemáticos disponibles: Bingham o Ley de Potencias y se determinan los parámetros reológicos. Puntos de cedencia negativos o muy bajos serán indicativos de inestabilidad (agua libre ò sedimentación). La mayoría de mezclas de cemento dará lecturas menores que 200 a 300RPM y generalmente lecturas mayores podrían generar un problema de mezcla. Las lecturas de 3 y 6 RPM se han eliminado para evitar el efecto de deslizamiento del fluido y la lectura de 600 RPM no es usada por el efecto de centrifugación(inestabilidad) que produce en las mezclas de cemento.

PERDIDA DE FILTRADO

El control de filtrado es necesario para:

- Mantener las propiedades de la mezcla de cemento mientras es colocada en el anular (reología, tiempo de bombeabilidad y densidad)
- Prevenir la deshidratación del cemento para evitar un taponamiento y excesivas presiones de bombeo, especialmente en un anular estrecho frente a una formación permeable
- Reducir la pérdida de presión hidrostática especialmente en pozos de alta presión poral
- Minimizar la invasión del filtrado hacia la formación.

Recomendaciones para controlar la Pérdida de Filtrado

(solo si se tienen zonas permeables o restricciones anulares)

Tipo de trabajo (Cementación Primaria)	Pérdida de Filtrado API(ml/30 min @ 1000 psi)
Prevención de migración de gas	30-50
Pozos horizontales	<50
Liners de producción	<50
Tuberías de Producción	
Mezcla de cemento principal(TS)	<150
Mezcla de cemento de relleno(LS)	<250
Otros trabajos de cementación	
Mezcla de cemento principal(TS)	<200
Mezcla de cemento de relleno(LS)	<300
(*) Cemento "G", 15.7 ppg - Pérdida de Filtrado >1000 ml/30min (sin aditivos, T= 95 °F)	

Es necesario tener en cuenta que una mezcla de cemento inestable que exhibe sedimentación dará valores irreales "muy buen control de pérdida de filtrado".

TIEMPO DE BOMBEABILIDAD(TT)

Comúnmente se usa como tiempo de bombeabilidad el tiempo necesario para terminar el trabajo más un margen mínimo de 1 hora. Este tiempo es controlado mediante la adición de aceleradores y retardadores.

La consistencia o bombeabilidad de la mezcla esta medida en unidades Beardon (Bc), una cantidad adimensional. El final del tiempo para la prueba de bombeabilidad es definido cuando la mezcla de cemento llega a 100 Bc, pero normalmente se considera inbombeable encima de 70 Bc y puede ser incluso difícil de bombear sobre los 40 Bc.

Las especificaciones de la prueba API de TT pueden no corresponder a las condiciones que la mezcla de cemento encontrará en el pozo, ya que la máxima temperatura y la máxima presión pueden no darse en el mismo punto y además están en cambio continuo. Tampoco el efecto de la pérdida de filtrado es tomado en cuenta, y no se especifica la forma de la curva de bombeabilidad.

En la Figura 18 se muestran algunas curvas típicas que permiten identificar algunos problemas potenciales. En las Figuras 18-E y 18-F se muestra el POD(punto de partida) que es el repentino incremento en la consistencia de hasta 30-40 Bc o casi insignificante. Este punto crítico muestra que el final de la etapa de hidratación ha llegado, el cemento esta comenzando a fraguar y si se continua el bombeo luego que el POD ha sido alcanzado, las propiedades del cemento serán dañadas. Por lo tanto el POD debe ser tomado como el TT real sin necesidad de llegar a 70 Bc. Adicionalmente en las Figuras 18-C y 18-D de acuerdo al tipo de curva de bombeabilidad se puede reconocer problemas de Gelificación.

GELIFICACION

Es una viscosificación o desarrollo de esfuerzo de gel prematuro en una mezcla de cemento. Esta puede traer como consecuencia una falla en el trabajo, por lo tanto debe ser identificado durante las pruebas de laboratorio. Desafortunadamente esta es impredecible y puede ocurrir inmediatamente luego del mezclado, durante el desplazamiento o cuando esta estático. Esta puede ser debido al agua de mezcla (cationes divalentes, o material orgánico), la composición del cemento, la microestructura, el tiempo que tenga el cemento y la respuesta de los aditivos a la Temperatura de circulación de fondo (BHCT).

Los cuatro tipos principales de gelación son:

- **Gelación primaria**

Ocurre durante el mezclado cuando la mezcla de cemento está a temperatura de superficie y en estado estático o a bajas velocidades de corte. Esta caracterizado por un significativo desarrollo del esfuerzo de gel, lo cual significa que la mezcla puede ser fácilmente inbombeable luego de un corto periodo de tiempo estático. Puede ser identificado midiendo el esfuerzo de gel a 1 min y a 10min y prevenido con el uso de aditivos.

- **Gelación secundaria**

Puede ser detectada por unos valores anormales de reología o esfuerzo de gel de 10min cuando la mezcla se encuentra a la "BHCT". Esta gelación puede causar serios problemas si existen paradas durante el trabajo. El mecanismo de este efecto no es muy claro, pero puede reducirse con el incremento de dispersantes, selección apropiada de retardadores(de acuerdo a la temperatura), o reduciendo la densidad de la mezcla si es posible.

- **Gelación terciaria**

Esta se manifiesta en la curva de TT (Figura 18 -C) cuando la consistencia de la mezcla se incrementa prematuramente. En tales casos la mezcla puede alcanzar 40 Bc en un periodo corto de tiempo y mucho más tarde las 100 Bc. El periodo final esta caracterizado por un incremento de la consistencia en forma de peldaños. La adición de aditivos puede contrarrestar este efecto.

- **Gelación cuaternaria**

Es un incremento repentino de la consistencia algunas veces mayor a 100 Bc, seguido de una disminución drástica del nivel de consistencia y la estabilización a una menor consistencia, pero encima de la línea base y normalmente encima de 40 Bc (Figura 18-D). Generalmente esta relacionado con el tipo de retardador usado, o la calidad de agua de mezcla. El uso de ciertos aditivos puede contrarrestar este efecto.

AGUA LIBRE

Cuando una mezcla de cemento esta estática, el agua se separa de la mezcla y migra a la parte superior acumulándose en forma de bolsas dentro de su estructura o en su tope, lo cual puede resultar en un aislamiento incompleto. El movimiento del "agua libre" es controlado por el contenido de sólidos de la mezcla y el mecanismo de sedimentación de sus partículas. El agua libre migrará a través del cemento bajo el peso o el esfuerzo de la columna.

La tendencia del agua libre puede ser reducida:

- Incrementando la densidad de la mezcla
- Usando un aditivo estabilizador
- Asegurándose que la mezcla no este sobredispersa
- Incrementar la viscosidad del agua intersticial(adición de bentonita, silicatos)

El agua libre de una mezcla de cemento neto no debe exceder 3.5 ml en 250 ml de muestra, ò 1.4 %. En casos críticos debe ser menor que 1.0 ml y en zonas de gas debe ser cero. En pozos altamente desviados u horizontales, la prueba de laboratorio se debe realizar con 45° de inclinación y en estas condiciones el agua libre debe ser cero.

SEDIMENTACION

Las partículas de cemento pueden caer de la suspensión y comenzar la deposición creando diferentes densidades a lo largo de la columna de cemento. Los cambios en la densidad cambian las propiedades del cemento lo cual puede conducir a una invasión del anular, el taponamiento del sistema de mezcla o de equipo de flotación.

La tendencia de una mezcla que presenta sedimentación puede ser mejorada:

- Incrementando la densidad de la mezcla de cemento
- Disminuyendo los agentes de peso o cambiándolos
- Asegurándose que la mezcla no este sobredispersa
- Usando aditivos para evitar sedimentación(bentonita)
- Incrementando el aditivo de control de Filtrado

COMPATIBILIDAD DE FLUIDOS

La mezcla de cemento, los Lavadores y los Espaciadores deben ser compatibles entre cada uno y con el lodo para evitar la formación de mezclas aún más difíciles de desplazar.

Reología de una mezcla Incompatible (Cemento+Lodo)

% Cemento/% Lodo (V)	PV (cp)	T _v (lb/100 ft ²)
100/0	38	45
60/40	60	100
50/50	60	140
40/60	Fuera de escala	Fuera de escala
0/100	30	18

Si en el pozo se forman las mezclas mostradas en el cuadro "mayor punto de cedencia y mayor viscosidad plástica que los fluidos iniciales", esto generará:

- Un incremento en las caídas de presión por fricción incrementando la posibilidad de fractura de las formaciones débiles
- El taponamiento de la parte angosta del anular excéntrico
- Afectará la eficiencia de la remoción del lodo al régimen de flujo seleccionado
- Producirá la contaminación del cemento afectando sus propiedades

ESFUERZO COMPRESIVO (CS)

El Esfuerzo Compresivo da una indicación de la capacidad del cemento fraguado para proporcionar aislamiento zonal, proteger y soportar la tubería. Los esfuerzos compresivos también son usados como criterio para decidir cuando el cemento debe ser perforado o baleado.

Los esfuerzos mínimos aceptados son mostrados en la siguiente tabla:

Aplicación	Esfuerzo Compresivo Mínimo
Soportar la tubería	500 psi
Perforación del zapato	500-800 psi
Baleo	2000 psi
Tapón de desviación	5000 psi

El C.S. también dependerá del mínimo establecido por las leyes

Para el baleo, el valor de esfuerzo compresivo esta sujeto a debate. Depende del tipo de cañones, el método de prueba y la interpretación de los resultados. Se recomienda el baleo luego que el cemento ha alcanzado 500 psi de CS, sin embargo otros recomiendan que debe ser cuando se tenga 2000 psi de CS(encima de 2000 psi el cemento comienza a quebrarse al ser baleado y debajo de 200 psi la adherencia hidráulica del cemento es destruida).

Los valores de Esfuerzo Compresivo basados en la prueba API en la cual se preparan unos cubos de cemento solo son indicativos de la integridad del cemento bajo una carga axial sin restricciones laterales. Sin embargo no proporciona una guía para los efectos de una carga triaxial, ni tampoco da un valor de esfuerzo de adherencia entre las interfaces.

2.4 CONSIDERACIONES ESPECIALES PARA POZOS ALTAMENTE DESVIADOS U HORIZONTALES

La mayoría de pozos horizontales han sido completados a hueco abierto o con lina ranurada. Sin embargo hay un número significativo de pozos que han sido cementados en su porción horizontal o en su sección de "build-up" (construcción del ángulo). La cementación de la sección de "build up" puede ser necesaria para aislar una capa de gas o formaciones cercanas a la formación objetivo mientras que la cementación de la porción horizontal puede ser necesaria si el pozo va a ser fracturado ya que es único método que puede asegurar un espaciamiento entre las fracturas y un adecuado aislamiento zonal.

La cementación de la sección de build up y de la sección horizontal es muy difícil debido a lo pronunciado de la desviación del pozo. Para asegurar el éxito es necesario aplicar los principios de una cementación de pozos horizontales.

Los cuatro tipos de pozos horizontales de acuerdo a la velocidad de construcción del ángulo son:

Radio super corto	OH Velocidad de construcción de ángulo Penetración horizontal Varios huecos son perforados, todos radialmente desde un mismo punto en un pozo vertical	2" 90°/ft 100-200 ft
Radio corto	Velocidad de construcción de ángulo Penetración horizontal	1.5 -3 °/ft 1000 ft
Radio medio	Velocidad de construcción de ángulo Penetración horizontal	8-20 °/100ft 5000 ft
Radio largo	Velocidad de construcción de ángulo Penetración horizontal	3-8 °/100ft > 10000 ft

Solo los pozos de radio medio y largo pueden ser completados y cementados con las técnicas convencionales.

FACTORES QUE CONTRIBUYEN A UNA CEMENTACION EXITOSA

⇒ Geometría del Pozo

La geometría del pozo es importante para alcanzar las condiciones necesarias para una cementación apropiada. En los pozos altamente desviados, la trayectoria del pozo está influenciada por un sin número de factores, incluyendo la naturaleza de la roca y los parámetros de perforación, estos pueden crear problemas únicos para la cementación(Figura 20):

- **“Doglegs” y zigzags**

Pueden ser causados por los cambios en las propiedades de la roca y el buzamiento de la formación

- **Hueco en forma de Espiral**

Puede ser causado por la carga excéntrica de las brocas tricónicas y el enroscamiento helicoidal de la tubería a medida que es bajada en el pozo.

- **Huecos Elípticos**

Pueden ser causados por el desgaste que produce la tubería contra el hueco o por los esfuerzos de la formación y las propiedades anisotrópicas de la roca.

- **Hueco Ondulante o con ensanchamientos periódicos**

Puede ser causado por un control inapropiado de los parámetros de perforación cuando se esta usando un “bent sub”

- **Asientos de llave(“keyseats”)**

Puede ser causado por el continuo roce de la tubería con el hueco durante la perforación y los viajes

⇒ Fluido de perforación y parámetros de perforación

La formación de una capa de sólidos en la parte inferior de la tubería tiene que ser prevenida para que no haya problemas en los viajes de la tubería de perforación ni en los de la tubería de revestimiento. Una vez que los sólidos se depositan son muy difíciles de recoger en un pozo horizontal. La presencia de esta capa aumenta el torque y el arrastre de manera que la tubería de revestimiento no puede ser rotada ni reciprocada durante el acondicionamiento y/o la cementación. Finalmente esta capa sirve de canal de comunicación entre las diferentes formaciones impidiendo el aislamiento deseado.

Adicionalmente, es necesario un control de los parámetros de perforación: velocidad de penetración, viajes de limpieza(especialmente cuando se perfora con un motor de fondo y la tubería no rota), pastillas viscosas y reciprocación de la tubería.

⇒ **Remoción del lodo**

Como en una cementación convencional, el desplazamiento del lodo es esencial para un buen trabajo de cementación. Los principios normales para una remoción efectiva del lodo se aplican también a los pozos altamente desviados y horizontales. Sin embargo, hay algunas consideraciones adicionales:

- **Circulación del pozo previo a la cementación**

Es tan importante como en un pozo convencional para romper el esfuerzo de gel del lodo de manera que este pueda ser removido por los fluidos desplazantes. La circulación debe ser por lo menos de todo un anular "bottoms up"(pero preferiblemente dos volúmenes de hueco) y continuar hasta que un mínimo de 95 % del volumen total del hueco sea móvil. El Flujo Turbulento debe ser mantenido si las presiones de fractura de la formación no son excedidas.

En pozos altamente desviados u horizontales el enfriamiento es muy importante ya que la BHCT es mayor que para pozos verticales a la misma profundidad vertical y se aproxima a la BHST(temperatura estática) debido a que el fluido pasa mayor tiempo a una temperatura más alta. La correlación del API usa la profundidad vertical y el gradiente de temperatura para determinar la BHCT, lo cual no es correcto en este tipo de pozos. Es por esto necesario el uso de simuladores de temperatura para determinar correctamente la máxima temperatura de circulación y el mínimo tiempo de circulación para el enfriamiento del pozo.

- **Centralización**

La centralización es necesaria para proporcionar un anular con canales de flujo abiertos, además ayuda a reducir el arrastre de la tubería porque la mantiene lejos de las paredes del pozo. Si la tubería no es centralizada, esta se apoyará en la parte baja del hueco y no existirá un régimen de flujo o caudal que pueda remover el lodo entrampado en esta parte más angosta.

Los efectos de flotación y diferencial de densidades deben ser considerados en la planificación de la cementación. La colocación de un cemento de alta densidad cuando se tiene un lodo de baja densidad en el pozo puede tener como consecuencia una pobre centralización. El cemento que es más pesado tenderá a colapsar los centralizadores y puede "baypasear" el lodo(dejado en la parte estrecha del anular) antes que los flejes de los centralizadores vuelvan la tubería al centro del hueco. El uso de un fluido de desplazamiento liviano ayudará a restaurar la tubería al centro del hueco, sin embargo esto ocurre luego que el proceso de desplazamiento de lodo esta completo. En este caso, el

movimiento de la tubería ayudará a mezclar el lodo con el cemento, resultando en una mezcla no uniforme y frágil.

Debido a la importancia que tiene la centralización en los pozos horizontales, se recomienda el uso de tuberías de diámetro reducido. El uso de estas tuberías resultan en un menor peso en el centralizador o una menor fuerza de compresión (zona altamente desviada u horizontal) y por lo tanto una menor posibilidad de atasque. Cuando el espacio anular es más grande, las pequeñas deflecciones de los centralizadores tienen menor efecto, esto significa que a pesar de que la tubería este descentrada mantendrá un alto grado de **STO**. Por ejemplo para un hueco de 8.5" y una tubería de 5 ½" que esta desfasada 0.5" del centro se tiene un **STO** de 67% mientras que si la tubería es de 7" el **STO** es solo de 33%. Por lo tanto un hueco de 8.5" y una tubería de revestimiento de 5 ½" es mejor que una de 7" para la cementación, sin embargo puede no ser practica para la futura completación del pozo.

- **Fuerza de corrido de la tubería**

En los pozos Horizontales, debido a las largas secciones, la fricción o arrastre de la tubería mientras es bajada en el pozo puede ser bastante alta, en algunos casos inclusive puede ser mayor que la fuerza disponible para bajar la tubería en el pozo.

- **Movimiento de la tubería**

Cuando el hueco tiene una buena geometría, los riesgos de que la tubería con centralizadores quede atascada fuera del fondo o que se produzca un desenrosque de la misma son bajos. Muchos pozos horizontales han sido cementados rotando y reciprocando la tubería. Sin embargo durante la rotación no se deben exceder los limites de torque de la tubería, conecciones o colgador de lana.

- **Fluido de desplazamiento**

Un fluido de desplazamiento de baja densidad contribuye a minimizar la posibilidad de formación de un microánulo (un microánulo de más de 0.001in puede permitir el flujo de gas), sin embargo esta reducción no debe crear una presión diferencial excesiva alrededor del equipo de flotación ya que puede producir el colapso de la tubería o una falla en el equipo.

- **Efecto de cuña**

A bajos caudales de flujo (Flujo Laminar), existe la posibilidad de que el cemento como es un fluido mas pesado actúe como una cuña y canalice debajo del lodo (en las partes de

mayor inclinación del pozo). Sin embargo este efecto puede ser contrarrestado por el diferencial de velocidades entre el tope (ancha) y la parte baja de la tubería (normalmente la más estrecha del anular) resultado de la excentricidad de la tubería o una excentricidad aparente debido a la depositación de sólidos provenientes del lodo de perforación (en la parte baja de la tubería). Las recomendaciones en este punto se basan en la experiencia de campo la cual indica que el efecto de cuña no es tan significativo, especialmente para densidades normales de fluidos y mezclas de cemento.

- **Caudal de flujo**

Es preferible que todos los fluidos estén en Flujo Turbulento, incluyendo el lodo y el cemento, pero obviamente la potencia de los equipos y la presión de fractura deben ser considerados. La presión de fractura en los pozos horizontales puede ser diferente que en los pozos verticales, recientes publicaciones han demostrado que la inclinación del pozo y su orientación con respecto al máximo esfuerzo horizontal principal influyen la estabilidad del mismo.

En Flujo Laminar puede ser mejor tener una densidad de cemento más cercana a la densidad del lodo (sin sacrificar grandemente las propiedades del cemento fraguado) para evitar que el cemento actúe como una "cuña" y además ayuda a mejorar la centralización. En Flujo Turbulento, el efecto de cuña es reducido y se puede tolerar un diferencial de densidades más grande. Si no se puede tener la mezcla en Flujo Turbulento, entonces debe ser precedido por un espaciador en Flujo Turbulento o un Lavador químico, de manera que el cemento estando en Flujo Laminar Efectivo pueda desplazar fácilmente el fluido de baja viscosidad que tiene poca resistencia al flujo. Los cuatro criterios del FLE se deben cumplir. La densidad no tiene efecto en la sección horizontal pero si en la sección de construcción del ángulo o en la sección vertical.

⇒ **Lavadores y Espaciadores**

En cualquiera de los dos regímenes de flujo se producirá una densificación en la parte estrecha del anular (parte mas baja de la tubería) debido a la sedimentación de sólidos. Aún con Flujo Turbulento no habrá suficiente transferencia entre el tope y el fondo del hueco para redistribuir estos sólidos sedimentados. Además si durante la operación se produce una parada prolongada, el restableciendo del Flujo Turbulento puede no llegar a suspender los sólidos nuevamente. Como consecuencia la densidad y la viscosidad del fluido cambiará en varias partes del hueco afectando las características de flujo (presión por fricción, régimen de flujo). Debido a estos factores el movimiento de la tubería se hace sumamente importante.

- **Flujo Turbulento**

Se mantienen los 10 minutos de tiempo de contacto.

- **Flujo Laminar Efectivo(FLE)**

El volumen de Espaciador debe ser 60 bbl o 500 ft en el anular.

⇒ **Diseño de la Mezcla de Cemento**

Requiere las mismas consideraciones que las mezclas de cemento para pozos convencionales(sección 2.3.2) y otras características adicionales debido a la inclinación de pozo:

- **Estabilidad**

La estabilidad del cemento es siempre importante pero más en la situación de un pozo altamente desviado u horizontal. La estabilidad se refiere a dos propiedades de la mezcla de cemento: Agua libre y Sedimentación. El agua libre migra a la parte superior del pozo creando un canal a través del cual pueden fluir los fluidos, por lo tanto debe mantenerse lo mas bajo posible o "cero". La sedimentación puede producir la formación de un cemento de baja resistencia, alta permeabilidad y alta porosidad en la parte superior del pozo resultando en una mínima protección de la tubería, una posible comunicación a través del cemento y también en un posible taponamiento del equipo de flotación, por lo tanto debe ser menor que 5% o 1ppg.

Aunque estos dos fenómenos pueden producirse al mismo tiempo, no están necesariamente conectados. Cada uno puede existir sin el otro. Las pruebas de las mezclas de cemento deben asegurar que no se produzca ninguno de ellos.

- **Filtrado**

Las formaciones productivas van a estar expuestas por largos periodos de tiempo, además la longitud de la sección permeable es mayor, por lo tanto el filtrado de la mezcla de cemento debe ser bajo(menor que 50 cc/30 min).

- **Gelificación**

La mezcla de cemento no debe presentar gelificación para poder transmitir la presión hidrostática de la columna vertical y de la sección de construcción del ángulo ("build up").

Como una regla general, las mezcla de cemento en base a látex deben ser usadas cuando sea posible ya que estas proporcionan las mejores propiedades para la cementación de pozos horizontales: bajas reologías, baja pérdida de filtrado, y una muy buena estabilidad de la mezcla de cemento (no agua libre, no sedimentación)

⇒ Equipo de Flotación

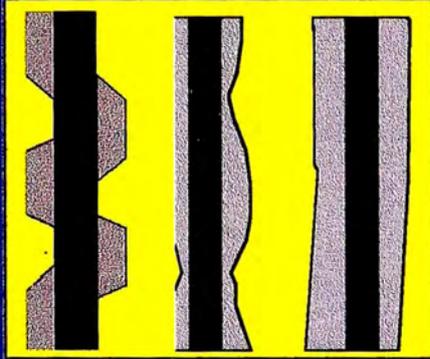
- **Equipo de flotación**

El equipo de flotación para pozos altamente desviados u horizontales debe sellar y prevenir el reflujó de cemento teniendo en cuenta que la diferencia de presión entre el anular y la parte interior de la tubería es mínima debido a la inclinación del pozo. Una válvula "flapper" o una válvula "poppet" que se activa con un resorte es recomendable.

- **Centralizadores**

Existen algunos centralizadores especiales para pozos horizontales que tienen un rodamiento que permite la libre rotación de la tubería dentro del centralizador reduciendo el arrastre, otros que pueden ser activados en profundidad que proporcionan un alto grado de **STO** y una mínima fuerza de corrido.

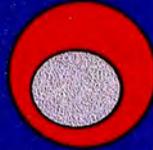
POZOS HORIZONTALES -GEOMETRIA



ZIGZAG

ESPIRAL

DOGLEG



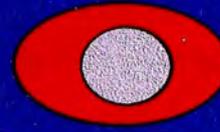
EXCENRICIDAD DE LA TUBERIA



DEPOSITACIÓN DE SÓLIDOS



ASIENTOS DE LLAVE



HUECO ELIPTICO

Fig. 20

REMOCIÓN DEL LODO

3. SIMULACION

La simulación de la dinámica de los fluidos dentro de la tubería y en el anular esta basado en ecuaciones de balance de masa y energía que consideran la existencia de fuerzas hidrostáticas, fuerzas viscosas y fuerzas inerciales, asumiendo en todo momento una eficiencia de desplazamiento de 100% (una interface plana entre dos fluidos diferentes). Los resultados que se obtienen de la simulación, muestran las **Presiones Dinámicas** a diferentes profundidades, los **Caudales de retorno (Q_{out})**, el **Tiempo de Contacto** ó el **Volumen Efectivo**. Conociendo estos parámetros, se puede:

- Chequear el control del pozo
- Optimizar los caudales de bombeo Q_{in} para cada fluido con el fin de maximizar la remoción de lodo en Flujo Turbulento y/o Flujo Laminar Efectivo (FLE)
- Identificar problemas potenciales y modelar las diferentes soluciones

3.1 PROCESO DE DISEÑO

El diseño es un proceso iterativo en el cual la información disponible es recogida y analizada, el pre-diseño es preparado y mejorado a medida que se tiene mas información y finalmente el pre-diseño es confirmado o modificado cuando la información del pozo este completa, generando el diseño final.

Análisis de la información

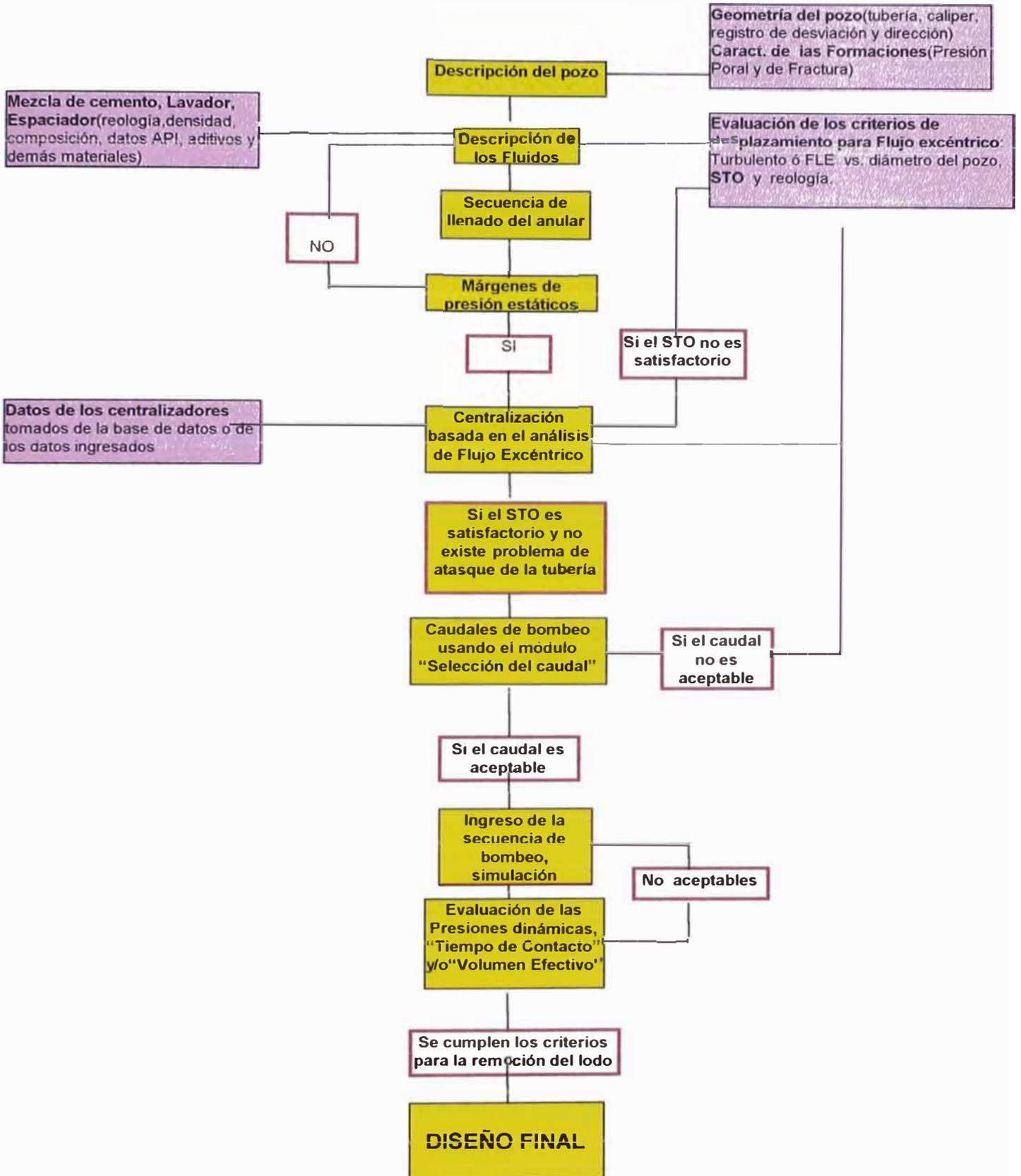
Debemos hacer un **análisis preliminar** para definir los lineamientos generales para el pre-diseño. En el CEMCADE se determinan los sistemas de cemento a usarse, aditivos, Régimen de Flujo para la remoción del lodo, técnica de colocación del cemento (una sola etapa o múltiples etapas) entre otros.

CONDICIONES DEL POZO	PRE-DISEÑO
Tubería > 7" ó densidad de lodo >16 ppg	- Técnica de remoción del lodo - FLE
Lodo cortado con gas ó problemas de gas en pozos previos	- Mezclas especiales
Desviación > 60 ^o	- Diseño para pozos horizontales
Arcillas sensitivas al agua o formaciones lutíticas	- Uso de KCL (2-3% BWOW)
Formaciones de bajo gradiente de fractura (< 0.8 psi/ ft)	- Sistemas de cemento de baja densidad - Bajas presiones de colocación - Mínimo tope de cemento
Pérdida de circulación potencial	- Materiales para pérdida de circulación - Mezclas especiales
Problemas de adherencia en las cementaciones previas	- Sistemas de cemento que mejoran la adherencia ó presentan expansión - Mejoras en la remoción del lodo

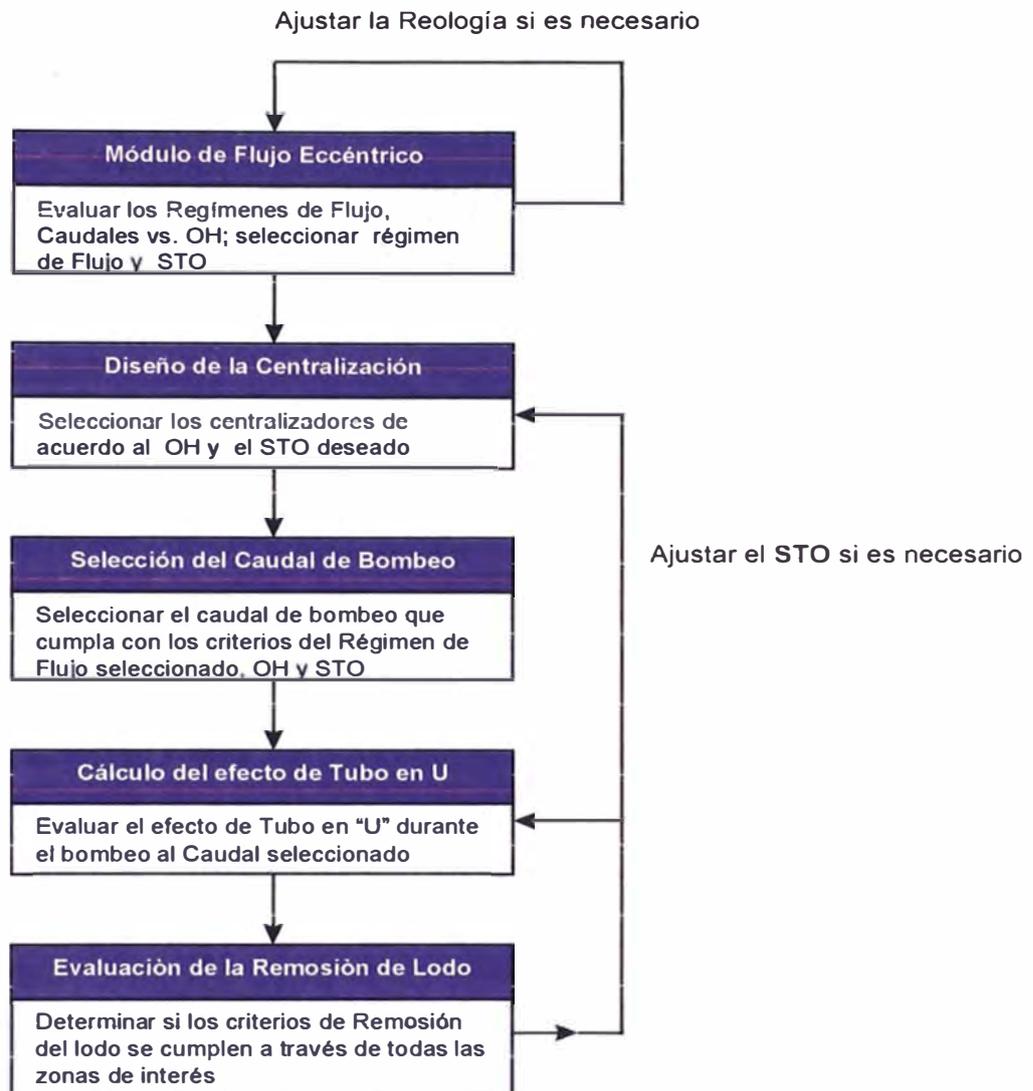
A medida que se obtiene más información del pozo, mediante un **análisis detallado** se determinan nuevos parámetros de diseño. Estos últimos sumados a la experiencia y referencias de trabajos anteriores generarán finalmente el Diseño Final.

NUEVOS PARAMETROS DE DISEÑO	DISEÑO FINAL
Zonas de gran diámetro en profundidades críticas(Caliper)	– Definir la Centralización y el Régimen de Flujo para la remoción del Lodo
Topes de las Formaciones Objetivo y BHCT real(Registros)	– Definir la densidad de la mezcla, reología
Presencia de crudo en el Lodo	– Uso de Solventes en los Lavadores y/o Espaciadores
Limitaciones en el Equipo de Flotación (Máximo caudal en el colgador del Liner)	– Definir el caudal máximo para el Régimen de Flujo seleccionado

CEMCADE - DISEÑO



CEMCADE - OPTIMIZACION DE LA REMOCION DEL LODO



3.2 DESCRIPCION DEL POZO

Geometría del pozo (Presión de Ruptura y Presión de Colapso de la tubería, Desviación, Azimut, severidad del cambio de ángulo (DLS), diámetro del hueco (OH))

Presión de Ruptura

La presión de ruptura se incrementa con la tensión (peso) y disminuye con la compresión (flotación de la tubería). Durante el trabajo, la máxima presión interna se produce en el momento que llega el tapón superior al collar flotador y/o cuando se tiene un posible taponeamiento del equipo de flotación bombeando a altos caudales.

Presión de Colapso

La presión de colapso disminuye con la tensión e incrementa con la compresión. Durante el trabajo, la máxima presión externa se produce cuando se tiene un fluido más pesado en el anular y/o cuando se tiene un efecto de "Tubo en U" excesivo (el nivel de fluido en la tubería disminuye y la presión total en el anular es grande debido al alto caudal y alta presión hidrostática generada).

Desviación y azimut

Los registros de desviación (vertical) y dirección (horizontal) son usados para el diseño de la centralización y el corrido de la tubería. Aún en pozos verticales donde no se tienen datos de desviación, se recomienda un ángulo de 2-4° y una dirección de 0.5°/100 ft para la profundidad final del pozo. Esto ayudara a tener en cuenta las posibles irregularidades del hueco.

Severidad del cambio de ángulo(DLS)

El **DLS** están limitado generalmente a 4-6°/100 ft y es uno de los criterios principales para determinar el espaciamiento entre los centralizadores

Diámetro del Pozo(OH)

Los Registros de Calibre("Caliper")disponibles se muestran en la figura 21:

- **Caliper de dos patas**

Solamente mide el hueco en su parte más amplia. En un hueco ovalado esta herramienta sugerirá un diámetro exagerado resultando en un volumen de hueco demasiado grande.

- **Caliper de tres patas**

Las patas están mecánicamente conectadas, y como resultado de esto la presión en dos de las patas es suficiente para medir el hueco resultando en un volumen de hueco más pequeño que el real.

- **Caliper de cuatro patas**

La principal ventaja de este tipo de herramientas es que se tiene la posibilidad de medir dos diámetros diferentes, permitiendo mayor exactitud en la lectura de huecos ovalados

Excesos (%V) recomendados solo para la sección anular (hueco abierto)

Sobre la información de un Caliper completo 15-20%

Sobre el diámetro del hueco (broca)

Tubería de superficie	100 %
Tubería intermedia	50%
Tubería de producción	20-30%
Liner	20-30%

3.3 SECUENCIA DE LLENADO DEL ANULAR

Permite definir la secuencia de fluidos que será bombeada (topes de cemento, volúmenes) y verificar los márgenes estáticos de presión poral, presión de fractura, presión de ruptura y colapso de la tubería así como también la fuerza de levantamiento resultante sobre la tubería.

Fuerza de Levantamiento resultante sobre la tubería (RF)

Es la diferencia entre el peso de la tubería y la máxima fuerza de levantamiento sobre la misma (calculada en las condiciones estáticas al final del trabajo de cementación). Cuando la RF es un valor negativo, la tubería será levantada fuera del pozo por lo tanto debe ser asegurada antes de iniciar el trabajo de cementación

$$MLF = 3.14 \cdot 16 / 4 \cdot D_{tub}^2 (PH_{anular} - PH_{tub})$$

$$= 0.785 \cdot D_{tub}^2 (PH_{anular} - PH_{tub})$$

$$RF = W - MFL$$

MLF es máxima cuando se tiene:

- Tuberías de poco peso, corta longitud
- Tuberías de gran diámetro
- Alta densidad de la mezcla de cemento
- Baja densidad del fluido de desplazamiento
- Presión en el anular(superficie)

donde :

MLF	= Máxima fuerza de levantamiento sobre la tubería
D_{tub}	= Diámetro externo de la tubería
PH_{anular}	= Presión hidrostática en el anular
PH_{tub}	= Presión hidrostática dentro de la tubería
RF	= Fuerza de levantamiento resultante
W	= Peso de la tubería

3.4 DISEÑO DE LA CENTRALIZACION

3.4.1 LIMITES DE STO REQUERIDOS

Una buena centralización es necesaria para asegurar el desplazamiento eficiente del lodo, tanto en Flujo Turbulento como en Flujo Laminar. Un **STO** mínimo de 70 % proporciona una alta probabilidad de flujo en la parte estrecha del anular.

El programa de centralización requiere: la configuración del pozo, el ángulo, el peso de la tubería, la flotación, el Caliper, las profundidades y longitudes de los intervalos a ser cementados y las características del centralizador. Los cálculos específicos que realiza son:

- **STO** en el centralizador
- **STO** entre centralizadores.
- **STO** en el zapato

3.4.2 DISTRIBUCION DE FUERZAS EN LA TUBERIA DURANTE UN PROCESO DE CEMENTACIÓN

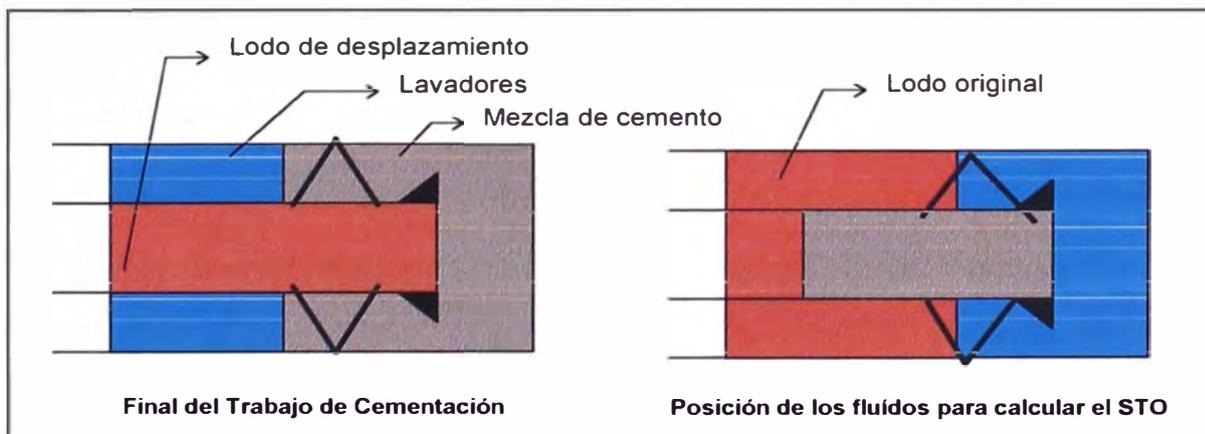
“Una Centralización efectiva plantea un equilibrio entre las Fuerzas Externas e Internas que actúan sobre la tubería”.

FUERZAS EXTERNAS	FUERZAS INTERNAS
<ul style="list-style-type: none"> • Peso de la Tubería de Revestimiento y de los fluidos que están dentro de la tubería 	<ul style="list-style-type: none"> • Tensión de la Tubería de Revestimiento (* Las otras Fuerzas Internas no son considerables)
<ul style="list-style-type: none"> • Efecto de Flotabilidad debido a los fluidos en el anular 	
<ul style="list-style-type: none"> • Reacciones de los Centralizadores 	

(*) Esta asunción proporciona buenos resultados cuando se compara con el método Mecánico Estructural que considera todos los Esfuerzos Internos.

Posición de los fluidos para calcular el STO

El efecto de Flotabilidad(empuje) es fuertemente afectado por la posición de los fluidos. Los cálculos de **STO** son hechos considerando la primera mezcla de cemento a punto de dar la vuelta por el zapato (el fluido más pesado dentro de la tubería) y el fluido más liviano (Lavador) en el anular.



3.4.3 TIPOS DE CENTRALIZADORES

Tanto en pozos verticales como en pozos desviados la tubería nunca quedará totalmente centralizada debido a los esfuerzos desiguales a los que esta sometida. Es por esta razón que es necesario el uso de centralizadores. Existen dos tipos:

Flexibles

- Normalmente el diámetro externo (Max OD) es mayor que el diámetro del pozo
- Son muy efectivos en zonas ensanchadas e irregulares. También pueden ser usados en un hueco en calibre o dentro de la tubería de revestimiento anterior dando casi el mismo **STO** que los centralizadores rígidos
- Siempre ejercen una fuerza en las paredes de la tubería y en el hueco en calibre. Proporcionan un **STO** variable de acuerdo a la carga aplicada al centralizador y la resistencia de los flejes
- Cuando son corrido en el pozo, generan un mayor arrastre en comparación con los centralizadores rígidos. La fuerza de corrido aumenta a medida que se incrementan el diámetro de los flejes y la fuerza de restauración
- Su área superficial reducida evita problemas de pegado por presión diferencial

Rígidos

- Generalmente están hechos de un cuerpo sólido(hierro o aluminio). Algunos poseen flejes, barras rígidas ó espirales.
- El diámetro externo es menor(1/16") que el diámetro del hueco
- Usado para zonas calibradas debajo del colgador de liner y dentro de la tubería de revestimiento previa
- Aseguran una "centralización positiva"(**STO** mínimo), debido al espesor de su pared sin importar la fuerza aplicada.
- A diferencia de los flexibles no se colapsan totalmente, y el arrastre es menor debido a su diámetro
- Los de cuerpo sólido al ser instalados sobre los anillos retenedores sirven como rodamiento facilitando la rotación de la tubería.

Recomendaciones teóricas sobre el posicionamiento de los centralizadores

Estas recomendaciones solo sirven como referencia. La posición final de los centralizadores debe ser determinada mediante el uso del modulo de centralización teniendo en cuenta que el **STO** es mejorado con una selección apropiada del tipo de centralizador.

- Tubería de superficie Uno encima del zapato, uno cada 2 o 4 juntas
- Tubería intermedia Uno en el zapato, uno cada 2 juntas

- Tubería de producción : Uno a dos por junta en las zonas productivas
- Liners : Uno a dos por junta
- Collar de etapas : Uno por junta encima y abajo del collar

Generalmente, en pozos altamente desviados u horizontales se requieren 3 centralizadores por cada dos juntas (3/2) o 2 centralizadores por junta (2/1).

3.4.4 MODELO MATEMATICO PARA EL CALCULO DEL STO

Consideraciones del módulo de Centralización

- Calcula el peor **STO** debido a la posición de los fluidos
- En el caso de tener Centralizadores que están flotando en el pozo, el Simulador considera que el Centralizador esta centrado en el pozo si no existe una Fuerza lateral, pero si la hay considera que el centralizador esta comprimido (centralizadores flexibles) y obligado a tocar la pared del pozo (centralizadores rígidos y flexibles).
- El Centralizador se considera como un resorte con comportamiento elástico lineal. Lo cual significa que la relación $F=K.X$ describe el comportamiento del centralizador (F=Fuerza, K= Rigidez, X= Compresión).
- Una Rigidez diferente es asumida para cada diámetro de hueco dado. Para cada profundidad, el simulador utiliza la prueba API ($RF_{67\%}$) con el radio de la tubería de prueba más cercano al diámetro real del hueco

$$RIGIDEZ(K) = \frac{RF_{67\%}}{1/3 (R_{prueba} - R_i)}$$

Donde:

$RF_{67\%}$ = Fuerza de Restauración a 67% STO
 R_{prueba} = Radio interno de la tubería de prueba
 R_i = Radio de la tubería de Revestimiento

METODOS DE CALCULO DEL STO

Los cálculos se realizan en dos pasos independientes en los cuales la sarta de Revestimiento es subdividida en vigas elementales. Los cálculos son hechos viga por viga desde el fondo hasta el tope de Centralización.

1. STO EN EL CENTRALIZADOR - Fuerzas sobre los Centralizadores

La Fuerza lateral en un Centralizador es calculada con el equilibrio de dos segmentos sucesivos de Tubería de Revestimiento entre los Centralizadores (Figura 22)

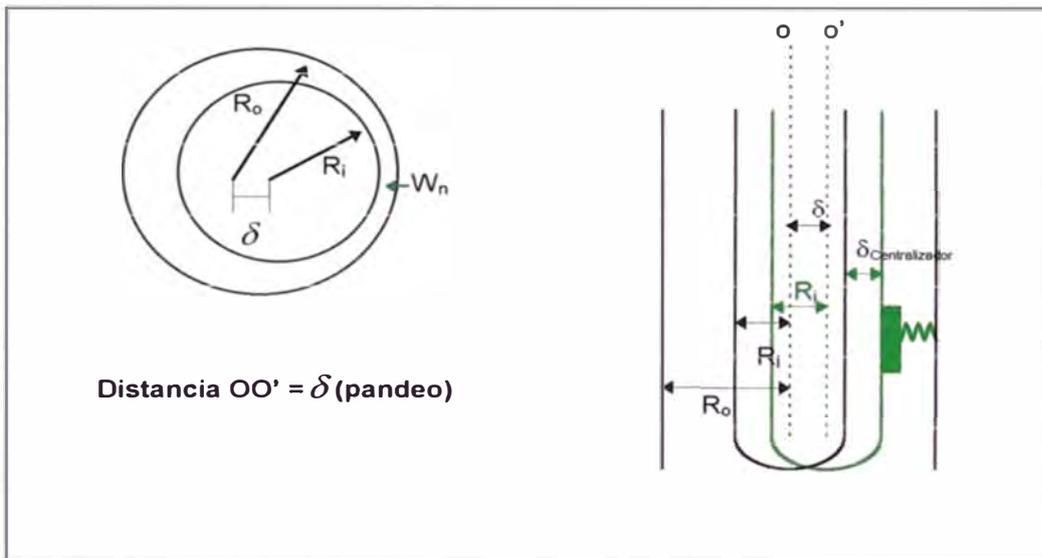
$$\delta_{\text{Centralizador}} = (\text{Fuerza lateral})/(\text{Rigidez del resorte}) \dots \dots \dots \text{Compresión del Centralizador}$$

STO en el centralizador

$$\begin{aligned} \text{STO}_{\text{Centralizador}} &= 100 * W_n / (R_o - R_i) = 100 * [(R_o - (R_i + \delta)) / (R_o - R_i)] \\ &= 100 * [1 - \delta / (R_o - R_i)] \end{aligned}$$

donde:

STO	=	Relación del STO
W_n	=	Ancho del anular más pequeño
R_o	=	Radio del pozo
R_i	=	Radio de la tubería
δ	=	Pandeo de la Tubería de Revestimiento
$\delta_{\text{Centralizador}}$	=	Compresión del Centralizador



Del gráfico anterior se demuestra que: $\delta = \delta_{\text{Centralizador}}$, por lo tanto:

$$\text{STO}_{\text{Centralizador}} = 100 \times [1 - \delta_{\text{Centralizador}} / (R_o - R_i)]$$

El centralizador tiene que soportar la parte del peso debido a las vigas superior e inferior. La Fuerza lateral que actúa sobre el centralizador es aproximadamente una función lineal del espaciamiento entre centralizadores (depende de la longitud de las vigas superior e inferior). Además un centralizador no puede ser comprimido mas allá del mínimo diámetro de compresión, lo cual lleva a considerar un mínimo **STO** (no igual a 0%) en el centralizador.

2. STO ENTRE CENTRALIZADORES- Pandeo de la Tubería de Revestimiento entre los centralizadores

La deflexión se calcula mediante la fórmula de Timoshenko para una viga fija en ambos extremos (entre dos centralizadores) a la que se le aplica tensión(Figura 23).

La fórmula de deflexión no es una función lineal del espaciamiento entre los centralizadores. Un ligero incremento del espaciamiento entre centralizadores hace que los valores de deflexión se incrementen bruscamente.

STO en la zapata

Entre la zapata y el primer centralizador no se puede aplicar la formula de Timoshenko. El pandeo se calcula como la deflexión de una viga fija en un extremo (Figura 24).

3.5 DISEÑO DE LA BAJADA DE LA TUBERIA REVESTIDORA

Este módulo simula el viaje de la tubería de revestimiento hacia abajo y hacia arriba en el pozo y predice el peso en el gancho en los dos casos. El peso en el gancho es el balance entre la Carga Activa y la Fuerza de Arrastre total. La Carga Activa es una componente del peso de la tubería de Revestimiento que contribuye al descenso del mismo en el pozo. La Fuerza de Arrastre total es la suma de las Fuerza de Fricción ejercidas en la sarta de Revestimiento.

Los cálculos son hechos asumiendo que las presiones por fricción actúan en los centralizadores. Esta fricción resiste el movimiento de la tubería y es mayor en un pozo abierto que en un pozo entubado (ya que la rugosidad de la formación tiene un mayor coeficiente de fricción). También tiende a ser mayor con lodos base agua que con lodos base aceite y es afectada por la cantidad y tipo de aditivos del lodo.

Para el cálculo del arrastre generado por la tubería que se encuentra encima del Centralizador más superficial el módulo asume que esta parte de la tubería esta permanentemente en contacto con el hueco o con la tubería de revestimiento previa.

Fuerzas de Arrastre en la zona Centralizada

En la zona Centralizada, los cálculos de la Fuerza de Arrastre debido a los centralizadores están definidos como:

$$\text{Fuerza de Arrastre}_{\text{Cent}} = \underbrace{(\mu \cdot N)}_{\text{Fuerza de Friccion}} + DF_{\text{Cent}} = \mu \cdot (N + \text{RunF} / \mu_{\text{API}})$$

Donde:

- Fuerza de Arrastre_{Cent} = Fuerza de arrastre en la "zona centralizada"
- N = Fuerza Normal o lateral en el Centralizador
- DF_{Cent} = Fuerza de Arrastre debido a que el Centralizador toca la pared del pozo
- RunF = Fuerza de corrido proveniente de la prueba del fabricante
A mayor "RunF" mayor será la fuerza de arrastre DF_{cent}
- μ = Factor de Fricción entre el Centralizador y el hueco abierto
- μ_{API} = Factor de Fricción durante la prueba API (0.19 por defecto)
- W = Peso del segmento de Tubería de Revestimiento

	Pozo Vertical	Pozo Desviado	Pozo Horizontal
Carga Activa	W	W.cos θ	0
Fuerza de Arrastre Cent (*)	F _{Fricción} = 0	F _{Fricción} = $\mu \cdot W \text{ sen } \theta$	F _{Fricción} = $\mu \cdot W$

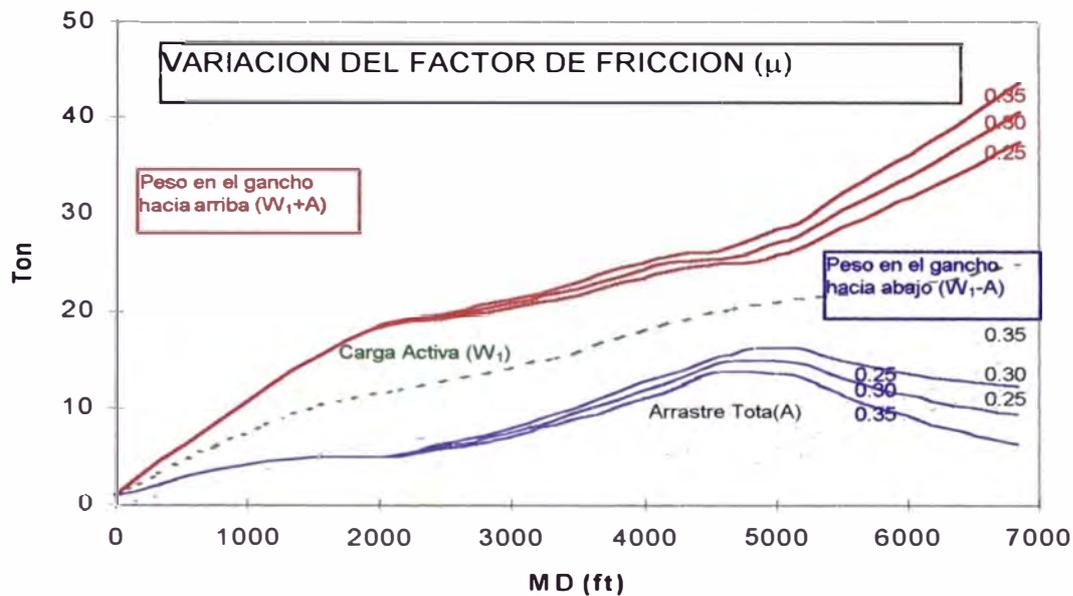
(*) A cada una de estas Fuerzas de fricción se adiciona \sum Fuerzas de Arrastre (DF_{Cent}) o Fuerzas de corrido de los centralizadores

La situación más crítica se presenta cuando la tubería de Revestimiento es horizontal, la Fuerza de Arrastre es máxima y la Carga Activa es "0". La mejor situación es cuando la tubería es vertical y la Fuerza de Arrastre es solo debido a las Fuerzas de Corrido de los centralizadores en el pozo.

Resultados del Módulo

Ingresando el peso del motón viajero que será usado para empujar la tubería en el pozo y el Factor de Fricción en el hueco abierto μ (0.15-0.4), las curvas que muestra este modulo son:

- **Carga Activa** (W₁)
Componente de peso que contribuye a bajar la tubería en el pozo
- **Fuerza de Arrastre total** (A)
- **Peso en el gancho hacia arriba** (W₁+A)
Representa la fuerza necesaria para sacar la tubería del pozo
- **Peso en el gancho hacia abajo** (W₁-A)
Representa el peso de la tubería que esta siendo bajada al pozo



La curva que representa la "Carga Activa" en ningún momento se interseca con la curva de "Arrastre Total" o lo que es igual, la curva del "Peso en el gancho hacia abajo" no alcanza valores negativos incluso con el mayor μ , donde se tiene el mayor Arrastre Total. Por lo tanto no habrá ningún problema de atascos bajando la tubería de revestimiento hasta la profundidad final del pozo.

El valor de " μ " puede ser ajustado haciendo la comparación entre el peso registrado en el equipo de perforación durante la bajada de la tubería y el "peso en el gancho hacia abajo". Solo la experiencia en el campo es una buena guía para la selección adecuada de este coeficiente de fricción.

3.6 PROCESO DE BOMBEO DE FLUIDOS - EFECTO DE TUBO EN "U"

Síntesis

Este efecto de "vacío" es causado durante una cementación primaria por el uso de fluidos más pesados (espaciadores y mezclas de cemento) que los que se encuentran originalmente en el pozo (lodo), lo cual crea un diferencial de presión entre la tubería y el fluido del anular. Mientras esto ocurre los caudales del anular (Q_{out} salida) son diferentes que los caudales de bombeo (Q_{in} entrada), lo cual tiene mucha importancia en la remoción de lodo y en la colocación de cemento.

3.6.1 DESCRIPCION TEORICA Y MEDIDAS PARA CONTRARRESTARLO

Para definir los efectos del tubo en "U", la dinámica del movimiento de fluidos debe ser analizada. El movimiento del fluido es muy complejo. Para simplificar la caracterización de este fenómeno se han hecho las siguientes asunciones en la Figura 25: la geometría de la tubería y del hueco son mantenidas constantes, el hueco es vertical, el caudal de bombeo (Q_{in}) es constante sin ninguna interrupción y se tiene solo el bombeo de dos fluidos (lodo y cemento) en el pozo.

Inicialmente en una condición estática, la presión hidrostática en la tubería es igual a la presión hidrostática en el anular en el fondo del pozo (Figura 25 - A):

$$P_{ht} = P_{ha} \quad (7)$$

Cuando comienza el bombeo, teniendo en cuenta las presiones por fricción se tiene:

$$Q_{in} = Q_{out}$$

$$P_{ht} - P_{ft} + P_{wh} = P_{ha} + P_{fa} + P_b \quad (P_{wh} = P_{ft} + P_{fa} + P_b) \quad (8a)$$

$$\dot{\circ} \\ P \text{ dinámica}_t = P \text{ dinámica}_a \quad (8b)$$

donde :

Q_{in}	=	Caudal de bombeo(entrada)
Q_{out}	=	Caudal de retorno de fluido del anular(salida)
P_{ht}	=	Presión hidrostática en la tubería
P_{ft}	=	Presión por fricción en la tubería
P_{wh}	=	Presión en la cabeza o presión de la bomba
P_{ha}	=	Presión hidrostática en el anular
P_{fa}	=	Presión por fricción en el anular
P_b	=	Presión en el anular en superficie(se asume como "0")
$P \text{ dinámica}_t$	=	Presión dinámica en el fondo para la tubería
$P \text{ dinámica}_a$	=	Presión dinámica en el fondo para el anular

En esta condición dinámica, un fluido de mayor densidad es bombeado dentro de la tubería (Figura 25 - B). La ecuación (8a) muestra que la presión por fricción en la tubería y la presión por fricción en el anular influyen de distinta manera en la presión en el fondo. Esto nos conduce a la siguiente relación:

$$P_{ht} - P_{ft} < P_{ha} + P_{fa} \quad (9)$$

Entonces para levantar la columna de fluido del anular y se cumpla la ecuación(2a) se necesita una presión extra en la cabeza (P_{wh}). A medida que el bombeo de este fluido pesado continua la presión en la cabeza necesaria para levantar la columna de fluido del anular se reduce, esto es debido al hecho de que la mezcla de cemento que esta entrando en la tubería tiene mayor densidad que el lodo reemplazado (P_{ht} se incrementa), provocando finalmente que la columna de fluido (cemento + lodo) en la tubería sea mas pesada que la columna de fluido del anular(lodo)

bajo condiciones dinámicas. La presión en la cabeza continua disminuyendo hasta llegar a un valor cero $P_{wh} = 0$. En este momento empieza el fenómeno de tubo en "U" caracterizado por:

$$P_{\text{dinámica}} > P_{\text{dinámica}} \quad (10)$$

Debido a este desbalance en el cual existe un diferencial de presión hidrostática que empieza a favorecer el movimiento hacia el anular, el movimiento de fluidos en el pozo empezara a buscar su propio caudal Q_{out} con el fin de satisfacer la ecuación (8b) buscando un equilibrio dinámico.

Las etapas del tubo en "U" o efecto de vacío son:

- **Caída Libre**

Los fluidos en el pozo se acelerarán debido al desbalance cayendo dentro de la tubería más rápido y dando vuelta más rápido hacia el anular que el caudal al cual son bombeados ($Q_{\text{out}} > Q_{\text{in}}$). Este movimiento acelerado de fluidos creara un espacio "vacío" debajo de la cabeza del pozo ($P_{wh}=0$) (Figura 25 - C). Durante esta etapa, es necesario chequear que el Q_{out} no colapse o fracture la formación debido a las elevadas caídas de presión generadas, además un $Q_{\text{out}} > Q_{\text{in}}$ no debe ser interpretado como una entrada de fluido al pozo.

El efecto $Q_{\text{out}} > Q_{\text{in}}$ puede ser reducido cambiando las densidades de los fluidos y/o volúmenes para reducir la presión hidrostática diferencial ó aplicando presión en el anular(estrangulador) evitando en todo momento fracturar la formación. Bombear tan rápido como sea posible durante esta etapa, solo incrementa la magnitud de la caída libre, lo cual debe ser evitado.

- **Punto de Balance**

A medida que el bombeo de cemento continua, el nivel de fluido sigue cayendo. Esta "caída libre" continua aun cuando el cemento ha dado la vuelta el zapato y se encuentra en el anular y termina cuando el caudal de retorno es nuevamente igual que el caudal de bombeo ($Q_{\text{out}} = Q_{\text{in}}$). Este punto es definido como el nivel máximo de caída libre o punto de balance (Figura 25 - D).

- **Llenado de la tubería**

Cuando el nivel máximo de caída libre ha sido alcanzado, el movimiento de fluidos en el pozo comenzara a disminuir ($Q_{\text{out}} < Q_{\text{in}}$), una vez más los fluidos del anular (cemento) bajo condiciones dinámicas tienden a ser mas pesados que los fluidos dentro de la tubería (Figura 25 -E).

P dinámica < P dinámica

En un punto dado el caudal de retorno Q_{out} puede ser incluso cero y los fluidos en el anular estarán en estado estático. Durante esta etapa un $Q_{out} < Q_{in}$ ó $Q_{out} = 0$ no debe ser mal interpretado como una pérdida de circulación parcial ó total y/o fractura de la formación y sería innecesario reducir el caudal de bombeo (Q_{in}) para solucionarla.

- **Nivel de fluido en superficie**

A medida que el bombeo continua, el nivel de fluido en la tubería se ira elevando hacia la cabeza del pozo. Una vez que ha retornado a superficie eliminando el espacio vacío, se necesitara nuevamente presión en la cabeza para levantar la columna de fluido en el anular y continuar el desplazamiento. Nuevamente el $Q_{in} = Q_{out}$ y la $P_{wh} > 0$. En que momento en que el nivel de fluido llega a superficie puede ser necesario reducir el caudal de bombeo ya que se puede fracturar la formación y/o dañar la tubería con esta repentina subida de presión (Figura 25 - F)

El comportamiento del caudal, nivel de fluido en la tubería y presión en la cabeza se muestran en la Figura 26.

Factores que influncian el Efecto de Tubo en "U"(ver Figura 26)

CAUSA	CONSECUENCIA
Mayor diferencial de densidad entre el cemento y el lodo	Periodo de tubo en "U" se extiende y la variación en los caudales de retorno(Q_{out}) es mayor
Reducción del caudal de bombeo(Q_{in}) durante la etapa de Caída Libre	El caudal de retorno(Q_{out}) comienza a disminuir debido a la reducción de las fuerzas de fricción y la energía de los fluidos.
Caudal de bombeo "cero"($Q_{in} = 0$) durante la etapa de Caída Libre	El caudal de retorno(Q_{out}) será mayor que "cero" y continuara disminuyendo debido a la reducción de las fuerzas de fricción.

3.6.2 INFLUENCIA EN EL PROCESO DE REMOSION DEL LODO

La aceleración y la desaceleración de los fluidos en el pozo crea problemas en el diseño de los caudales de desplazamiento. La influencia del cambio del caudal anular en el Flujo Turbulento respecto al Flujo Laminar Efectivo (FLE), se muestra en la siguiente tabla.

CAUDAL	FLUJO TURBULENTO		FLUJO LAMINAR EFECTIVO	
$Q_{out} > Q_{in}$	$Q_{out} > Q_{crit}$	El Tiempo de Contacto puede ser reducido ya que el fluido pasa muy rápido por la zona de interés	$Q_{out} > Q_{max}$	No se cumple el criterio de Velocidad Diferencial y el Volumen Efectivo se reduce (*)
$Q_{out} < Q_{in}$	$Q_{out} < Q_{crit}$	No existe Flujo Turbulento sobretodo en la parte mas estrecha del anular excéntrico	$Q_{out} < Q_{min}$	No existe Flujo Laminar en todo el anular. No se cumple el criterio MPG y el Volumen Efectivo se reduce (**)

(*) El Q_{max} es un valor bajo en las zonas de menor diámetro y bajo **STO**.

(**) El Q_{min} es un valor alto en las zonas de mayor diámetro y bajo **STO**.

TIPOS DE REGISTROS DE CALIBRE

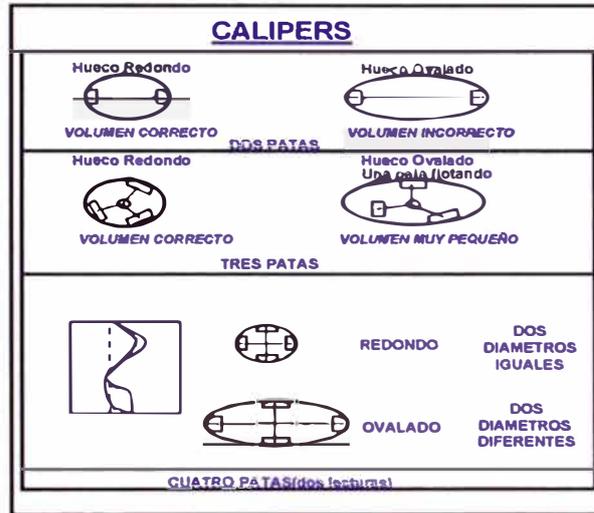


Fig. 21

PROCESO DE SIMULACION

STO EN EL CENTRALIZADOR

LA FUERZA LATERAL ES CALCULADA CON EL EQUILIBRIO DE DOS SEGMENTOS SUCESIVOS DE TUBERIA ENTRE LOS CENTRALIZADORES



$$\delta_{\text{centralizador}} = (\text{Fuerza lateral}) / (\text{Rigidez del resorte})$$

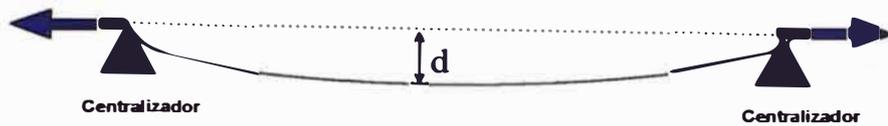
$$\text{STO}_{\text{centralizador}} = 100 \times [1 - \delta_{\text{centralizador}} / (R_o - R_i)]$$

Fig. 22

PROCESO DE SIMULACION

STO ENTRE CENTRALIZADORES

LA DEFLEXION SE CALCULA POR MEDIO DE LA FORMULA DE TIMOSHENKO PARA UNA VIGA FIJA EN AMBOS EXTREMOS A LA QUE SE APLICA TENSION



$$d = \frac{pL^4}{384EI} \left(\frac{24}{u^4} \right) \left(\frac{u^2}{2} - \frac{u \cosh(u) - u}{\sinh(u)} \right) \quad u = \sqrt{\frac{TL^2}{4EI}}$$

d : Deflexión de la viga	(m)
T : Tensión en los extremos de la sección	(N)
L : Distancia entre los centralizadores	(m)
p : Carga lateral sobre la tubería de revestimiento	(N/m)
E : Módulo de Young	(N/m ²)
I : Momento de Inercia	(m ⁴)
u : Número adimensional	

Fig. 23

PROCESO DE SIMULACION

STO EN EL ZAPATO

ENTRE EL ZAPATO Y EL PRIMER CENTRALIZADOR NO SE PUEDE APLICAR LA FORMULA DE TIMOSHENKO EL PANDEO SE CALCULA COMO LA DEFLECCION DE UNA VIGA FIJA EN UN EXTREMO



$$d_{max} = \frac{p \sin \theta}{8EI} L^4$$

d _{max} : Pandeo de la viga	(m)
L : Distancia entre el primer centralizador y el zapato de revestimiento	(m)
teta : Inclinación en el primer centralizador	(rad)

Fig. 24

PROCESO DE SIMULACION

ETAPAS DEL TUBO EN "U"

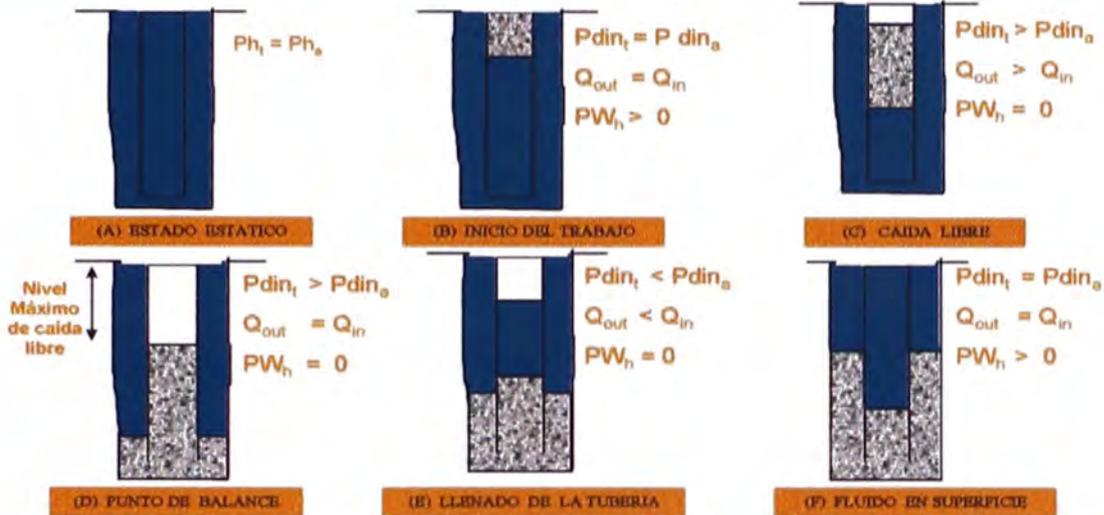


Fig. 25

PROCESO DE SIMULACION

" EFECTO DE TUBO EN U"



Fig. 26

PROCESO DE SIMULACION

FACTORES QUE AFECTAN EL TUBO EN "U"

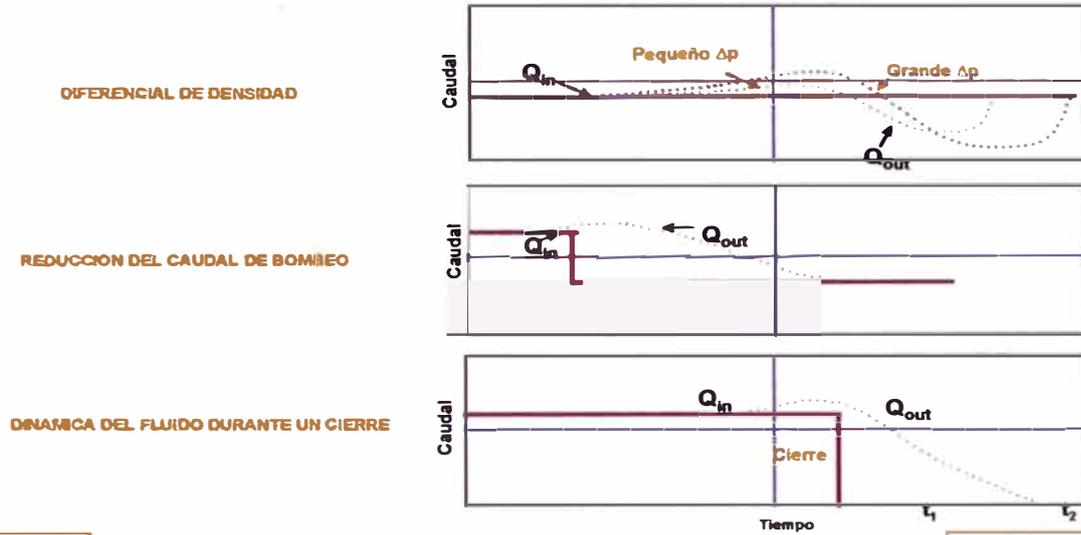


Fig. 27

PROCESO DE SIMULACION

4. DISEÑO DEL TRABAJO DE CEMENTACION

APLICACION DE LA METODOLOGIA A POZOS ALTAMENTE DESVIADOS - NOROESTE

OBJETIVO

Proporcionar un aislamiento completo y permanente de las formaciones Echino (tope @5270 ft) y Helico (tope @ 6200 ft) considerando la alta desviación del pozo.

DESCRIPCION DEL POZO

Configuración	: Tubería de producción 5 ½"
Total MD	: 6858.0 ft
Temperatura de superficie	: 80 °F
Gradiente de temperatura	: 0.88 °F/100 ft
BHST	: 110 °F
BHCT	: 92 °F
Broca	: 8 1/2 in

Tubería previa			
MD (ft)	OD (in)	Peso (lb/ft)	ID (in)
1872.0	9 5/8	43.5	8.755

Collar Flotador MD	: 6818.0 ft
Zapato Flotador	: 6858.0 ft

Tubería de producción							
MD (ft)	OD (in)	Junta (ft)	Peso (lb/ft)	ID (in)	Grado	P.Colapso (psi)	P.Ruptura (psi)
6858.0	5 1/2	40.0	17.0	4.892	N80	6280	7740

Diámetro promedio del hueco	: 9.721 in
Exceso anular(%)	: 10.0 %
Diámetro equivalente considerando el exceso	: 10.046 in
Volúmen total del hueco abierto	: 488.8 bbl (incluye exceso)

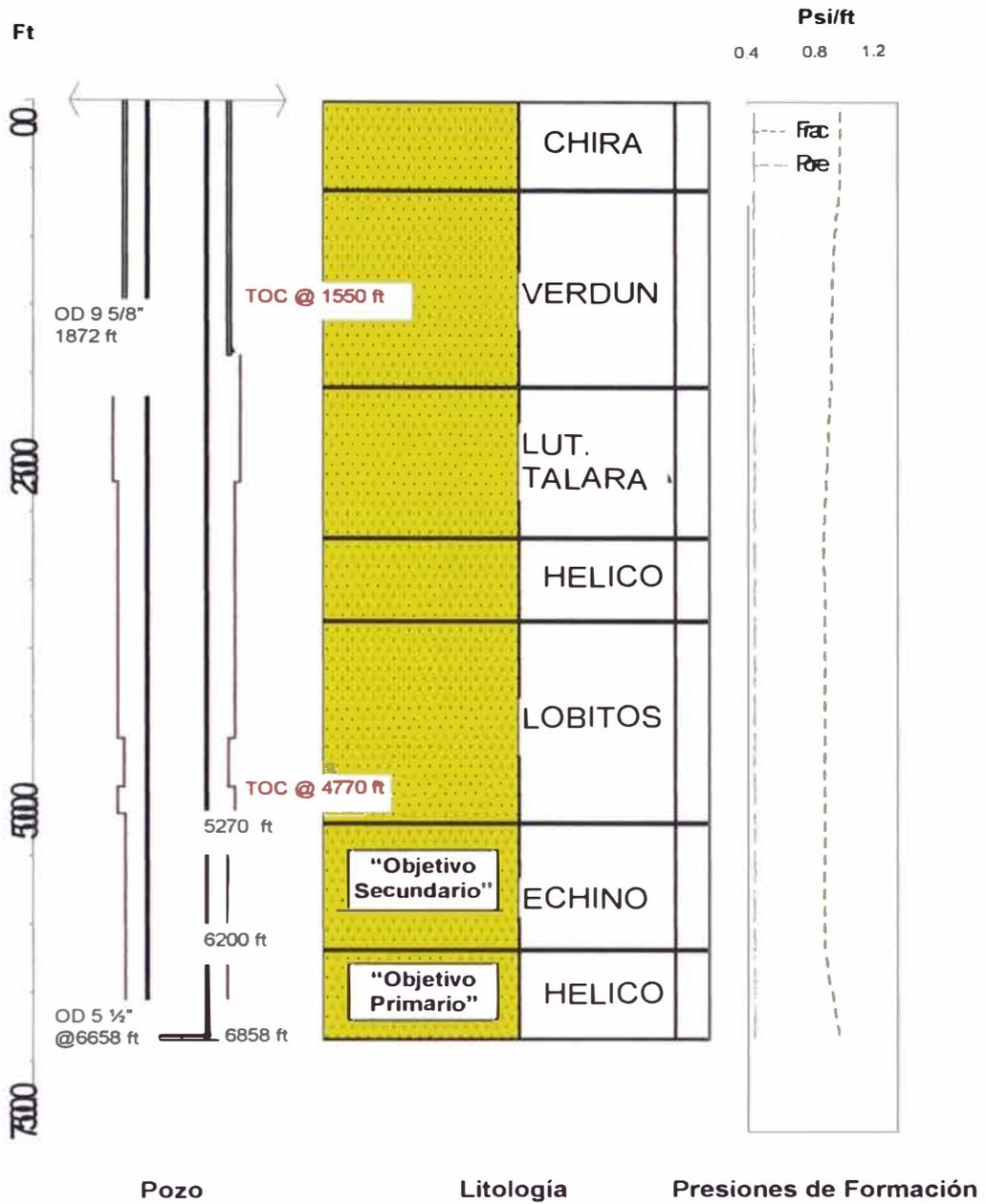
Datos del Caliper			
MD (ft)	Caliper (in)	Exceso (%)	Diam. Equiv. (in)
2800.0	11.000	10.0	11.405
4650.0	10.000	10.0	10.343
5000.0	9.000	10.0	9.278
5200.0	10.000	10.0	10.343
6858.0	8.700	10.0	8.957

(*) Solo se dispone de 1 diámetro del pozo

Datos de la Formation					
MD (ft)	Grad.Frac. (psi/ft)	Margen (%)	Grad Poral (psi/ft)	Margen (%)	Nombre
660.0	0.900		0.440		CHIRA
2100.0	0.850		0.440		VERDUM
3200.0	0.810		0.440		LUT. TALARA
3800.0	0.820		0.440		HELICO
5270.0	0.820		0.440		LOBITOS
6200.0	0.820		0.440		ECHINO
6858.0	0.900		0.440		HELICO

(*) Los gradientes porales han sido obtenidos de acuerdo a otros pozos vecinos

(*) Los gradientes de fractura han sido obtenidos en base a datos de las "presiones Standing"



Max. ángulo de desviación
 Max. DLS

: 81 deg
 : 8.368 deg/100ft

Datos de desviación y dirección(azimuth)				
MD (ft)	TVD (ft)	Desviación (deg)	Dirección (deg)	Dogleg Sev. (deg/100 ft)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
238.0	237.3	7.6	250.3	3.193
299.0	297.5	10.4	244.9	4.790
359.0	356.3	12.5	239.8	3.882
420.0	415.7	14.5	240.5	3.290
540.0	530.5	19.0	240.5	3.525
661.0	643.4	22.9	243.3	3.393
721.0	698.1	25.9	246.1	5.357
781.0	751.5	28.1	247.5	3.816
845.0	807.2	30.9	246.1	4.505
905.0	858.0	33.5	244.7	4.508
1059.0	982.0	39.3	252.4	5.346
1153.0	1052.8	42.9	255.2	4.301
1523.0	1294.5	57.0	251.0	5.254
1616.0	1342.0	61.6	250.3	4.988
1709.0	1384.0	64.6	250.3	3.226
1772.0	1410.7	65.4	251.0	1.621
1959.0	1485.2	67.6	250.2	1.240
1990.0	1496.8	68.7	250.3	3.561
2021.0	1507.8	69.5	249.6	3.333
2046.0	1516.4	70.2	251.7	8.368
2109.0	1537.4	70.9	251.7	1.111
2170.0	1557.2	71.2	252.0	0.677
2482.0	1659.1	71.2	251.7	0.519
2581.0	1691.3	70.8	251.0	-0.781
2642.0	1711.9	69.8	250.3	-1.963
2736.0	1745.4	68.4	250.3	-1.489
2829.0	1780.8	66.9	249.6	-1.757
2984.0	1845.1	64.1	249.6	-1.806
3109.0	1901.8	61.9	250.8	-1.957
3203.0	1947.5	59.9	251.0	-2.136
3356.0	2029.3	55.5	251.7	-2.902
3448.0	2081.5	55.3	252.4	-0.663
3541.0	2134.6	55.1	253.7	-1.168
3634.0	2188.5	54.0	253.8	-1.186
3759.0	2262.3	53.7	254.5	-0.512
3883.0	2334.4	55.2	254.5	1.210
4161.0	2486.4	59.2	256.6	2.312
4352.0	2579.0	62.8	257.4	1.920
4475.0	2633.1	65.0	258.7	2.025
4599.0	2683.2	67.3	260.1	2.123
4724.0	2728.9	69.8	261.6	2.291
4842.0	2767.5	72.0	263.0	2.175
4967.0	2804.1	74.0	264.4	1.925
5215.0	2863.9	78.2	266.5	1.873
5361.0	2890.8	80.6	267.9	1.895
5484.0	2912.4	79.1	268.6	-1.342
5608.0	2937.3	77.8	268.6	-1.048
5730.0	2964.4	76.5	268.6	-1.066
5853.0	2994.9	74.8	268.6	-1.382
6034.0	3046.6	72.0	270.3	-1.790
6188.0	3097.1	69.7	271.4	-1.639
6374.0	3165.4	67.2	272.1	-1.389
6561.0	3240.7	65.3	272.8	-1.072
6715.0	3307.1	63.6	274.2	-1.375
6776.0	3334.5	63.0	274.2	-0.984
6858.0	3371.8	63.0	274.2	0.000

4.1 SELECCION DE FLUIDOS

La zona de interés esta localizada entre **4770- 6858 ft** abarcando las dos formaciones objetivo y 500 ft encima de la formación Equino. Según el registro Caliper, los diámetros del hueco(OH)en esta zona no son muy grandes, lo cual permite seleccionar como primera opción un Lavador en Flujo Turbulento.

- **Lavador Químico - Flujo Turbulento**

Densidad 8.32 ppg

D122A* 0.5 gal/bbl(Surfactante)
U066** 10 gal/30 bbl(Solvente Mutual)
Agua Volúmen de Lavador

La prueba de compatibilidad entre el Lodo y el Lavador Químico (Anexo A) muestra que las mezclas formadas en distintas proporciones tienen menor reología y baja resistencia de gel, por lo tanto son mas fáciles de remover.

- **Mezclas de Cemento - Flujo Laminar Efectivo**

Las mezclas de cemento diseñadas para Flujo Turbulento serían las más recomendables debido a la alta desviación del pozo. Sin embargo como se verá en la sección 5.4, se necesitan muy bajas reologías para lograrlo y no es posible hacerlo con el cemento disponible (Tipo A). Por lo tanto el Flujo Laminar Efectivo será usado para el desplazamiento de las mezclas de cemento.

Se seleccionó una mezcla principal 15.6 ppg y una mezcla de relleno de 14.1 ppg con el fin de generar un mínimo esfuerzo compresivo a las 24 hrs (>1500 psi y > 1000 psi respectivamente) y además tener un diferencial de densidades de más del 10 % entre las dos mezclas y el lodo.

Para el diseño de las mezclas se consideraron las siguientes propiedades:

14.1 ppg	15.6 ppg
< 250 cc/30min	<50 cc/30 min
Agua libre mínima	Agua libre = 0 (45 ^o)
TT min(*) = 2:30	TT min(*) = 2:00

(*) Margen de Seguridad 1 hr.

En ambos casos las mezclas contienen aditivos especiales para evitar la sedimentación, y no se detecta ningún tipo de gelificación en las curvas de Tiempo de Bombeabilidad (Anexo A).

4.2 SECUENCIA DE LLENADO DEL ANULAR

Haciendo un cálculo inicial con el Lavador químico de 8.32 ppg y las densidades de cemento seleccionadas con los topes que se muestran en la tabla siguiente, el análisis de las presiones estáticas muestra que no existe riesgo de fracturar las formaciones o producir un desbalance en

el pozo, tampoco existen problemas de colapso o ruptura de la tubería y no es necesario asegurarla previo al trabajo de cementación.

Fluido Inicial	Lodo	10.50 ppg
Volúmen de desplazamiento	158.5 bbl	
Volúmen Total de Fluidos	566.2 bbl	
TOC(Tope de cemento)	1550.0 ft	

Fluido	Volúmen (bbl)	Longitud Anular (ft)	Tope MD (ft)	Densidad (ppg)
Lavador Químico	50	1109.3	440.7	8.32
Mezcla de relleno(*)	249	3220	1550	14.1
Mezcla principal (**)	109	2088	4770	15.6
Lodo	158.5			10.5

(*) Más de 300 ft dentro de la tubería de revestimiento previa(9 5/8")

(**) 500 ft encima de la formación ECHINO- Objetivo Secundario

	Mín. Margen (psi)	Profundidad (ft)	Descripción
Presión de Fractura (*)	483	3200	Mínima diferencia entre la presión de Fractura y la presión hidrostática anular a través del OH
Presión Poral (*)	139	1872	Mínima diferencia entre la presión hidrostática anular y la presión Poral a través del OH
Presión de Colapso (*)	5933	6818	Mínima diferencia entre la presión de Colapso de la tubería y la presión hidrostática diferencial
Presión de Ruptura	7641	1550	Mínima diferencia entre la presión de Ruptura de la tubería y la presión hidrostática diferencial durante la colocación de cemento
Fuerza de levantamiento resultante(RF)	20 ton		Diferencia entre el peso de la tubería y las fuerzas de empuje(MLF) al final del trabajo.

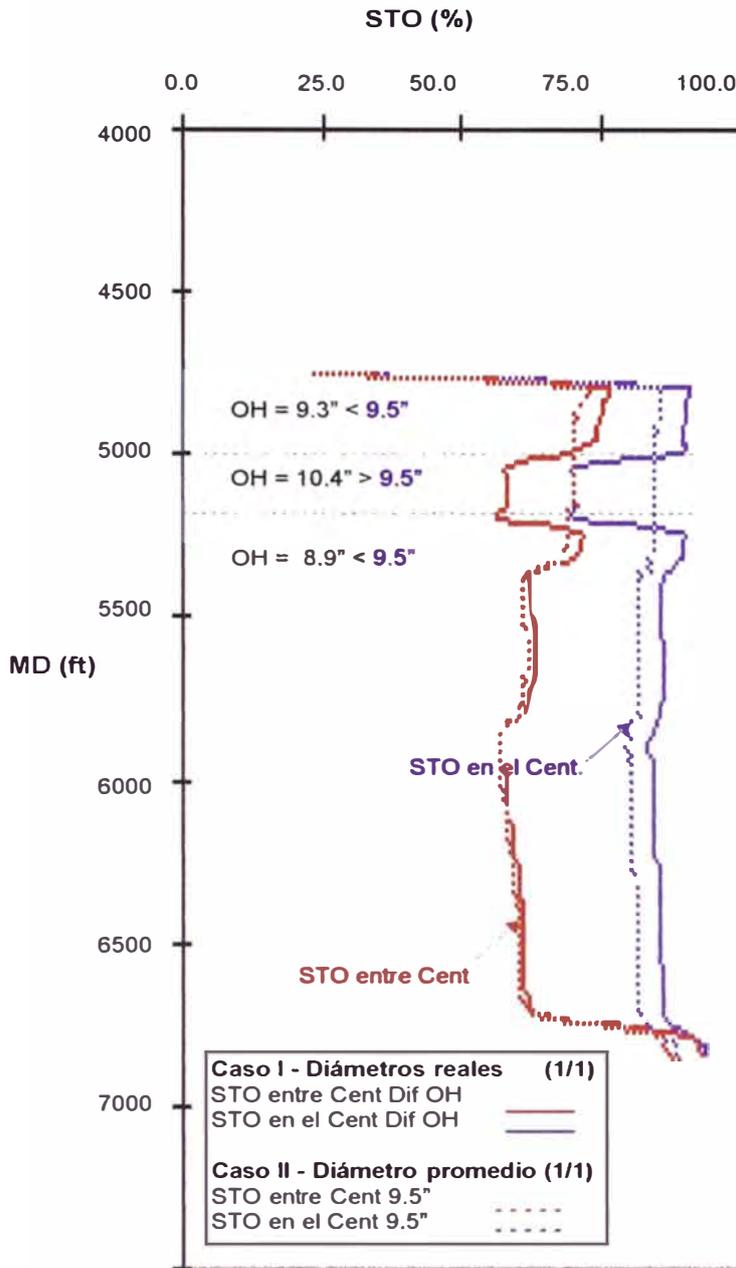
(*) Al final del trabajo de cementación

4.3 DISEÑO DE LA CENTRALIZACION Y DE LA BAJADA DE LA TUBERIA REVESTIDORA

El análisis de las variables que intervienen en el módulo de centralización nos va a permitir una optimización del **STO** y una selección adecuada del tipo de centralizador.

En todos los casos se ha considerado el tope de la centralización a 4770 ft, la misma geometría del pozo (desviación, dirección, OH) e iguales volúmenes de fluido, generando igual Fuerza normal en el centralizador e igual Fuerza de tensión en la tubería. La Fuerza de Inicio y La Fuerza de corrido del centralizador no modifican el cálculo de los dos tipos de **STO**.

Efecto de la variación del OH en el STO



Considerar un solo diámetro promedio para todo el hueco genera errores en la Centralización. Como se observa en la Figura 28 los dos tipos de STO se reducen si el diámetro del hueco es más grande. Por lo tanto es necesario especificar lo más detallado posible los diferentes diámetros de la zona a ser centralizada ya que de esto dependerá la variación real del STO y finalmente los caudales de diseño

(*)Para hacer la comparación se ha considerado diferentes volúmenes de Lavador para tener la misma altura en el anular y así generar las mismas fuerzas.

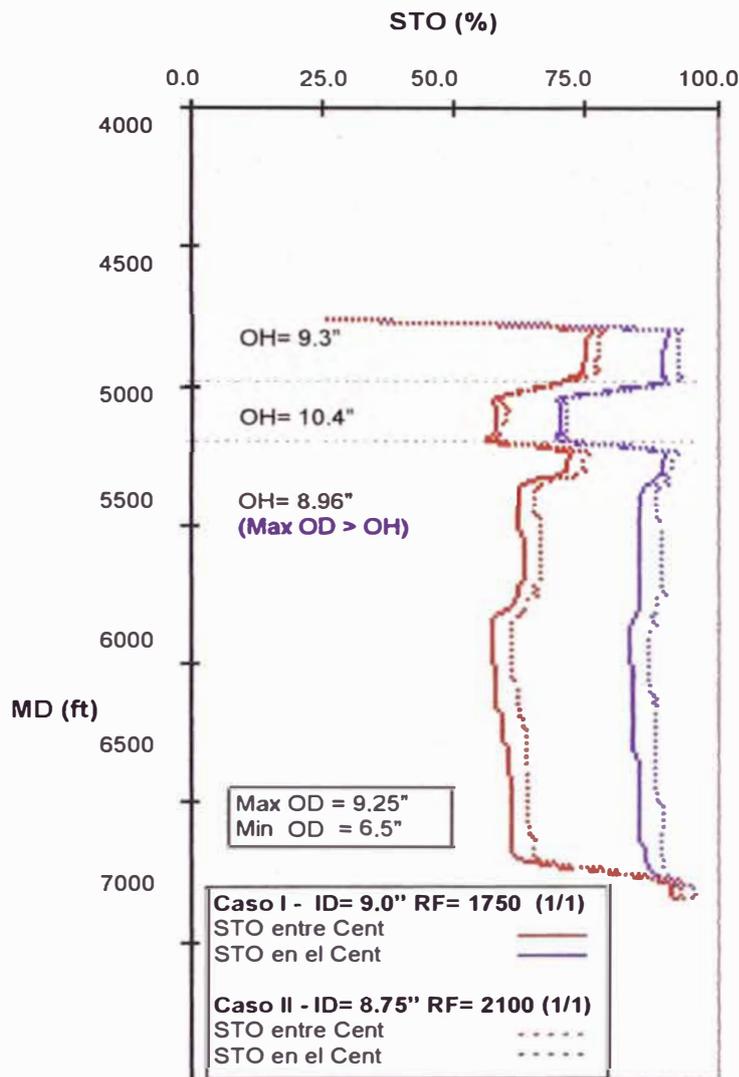
Figura 28

Efecto de la variación del diámetro de la tubería de prueba (ID) en el STO

La variación del STO para diferentes diámetros de prueba (ID) se puede explicar debido a que estos modifican mucho el cálculo de la rigidez (K) del centralizador. A mayor ID y por consiguiente menor RF, K es menor (*). Además como $F = K \cdot X$ y teniendo la fuerza F constante, si K es menor entonces X (compresión del centralizador) tiene que ser mayor, por lo tanto el STO se reduce.

$$(*) \text{ RIGIDEZ}(K) = \frac{RF_{67}}{1/3(R_{\text{prueba}} - R_i)}$$

Caso	Tipo de Centraliz.	Diámetro de prueba ID	Max OD	Min OD	Fuerza de Restauración RF (Lbf)	Fuerza de Inicio (Lbf)	Fuerza de Corrido (Lbf)
I	A	9.0"	9.25"	6.5"	1750	175	137
II	A	8.75"	9.25"	6.5"	2100	364	249



Como se observa en la Figura 29, solo en la zona donde **Max OD > diámetro del pozo**, un menor ID incrementará los dos tipos de STO. Por lo tanto es necesario seleccionar el diámetro de prueba (ID) del centralizador lo más cercano al diámetro del pozo para obtener una variación real del STO

Para este caso específico en el cual se tiene una gran sección del pozo de diámetro 8.96" si se toma el ID = 8.75" se tendrán valores muy altos de STO y si se escoge el ID = 9.0" los valores resultantes serán mas bajos pero más próximos a los valores reales.

Figura 29

Efecto de la variación de la Fuerza de Restauración(RF) y del diámetro máximo del centralizador(Max OD) en el STO

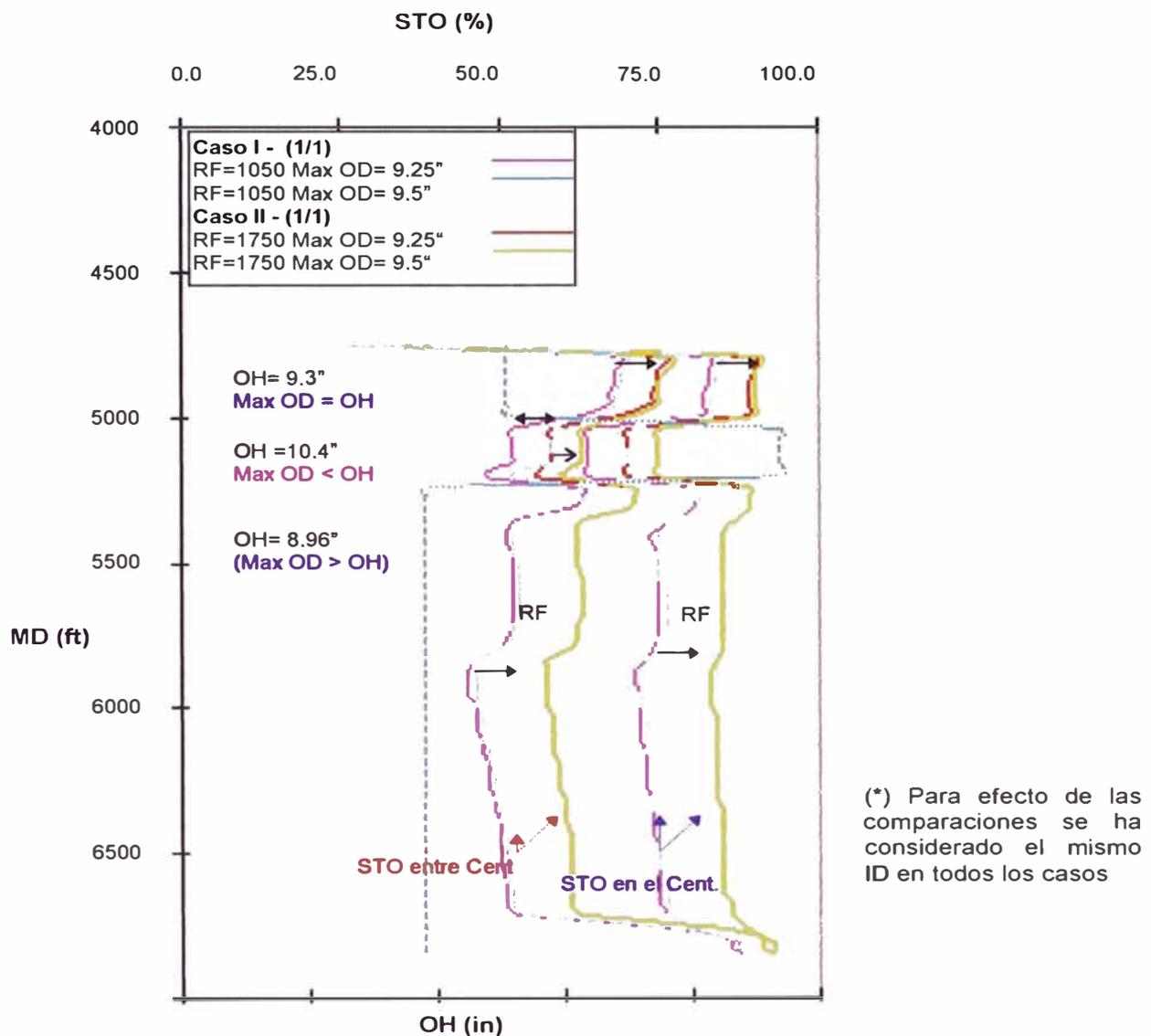


Figura 30

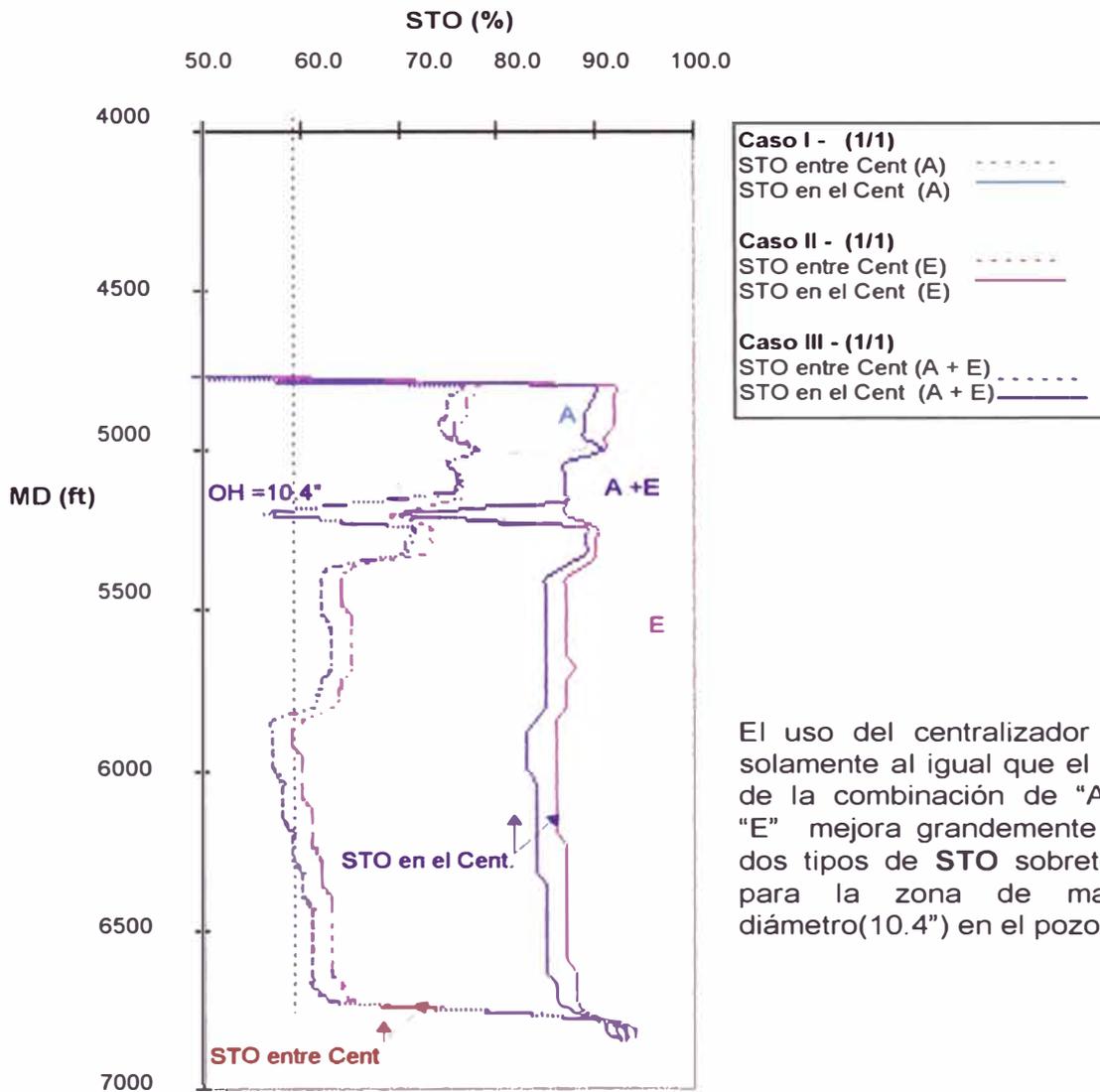
En la Figura 30 se observa :

- Si **Max OD** \geq **diámetro del pozo**, solo un incremento de la **RF** incrementará significativamente los dos tipos de **STO**
- Si **Max OD** $<$ **diámetro del pozo**, es recomendable tanto el incremento del **Max OD** como de la **RF** para incrementar significativamente los dos tipos de **STO**.

Determinación de la Centralización

Para este caso específico, con los Centralizadores tipo "A", en la Figura 31 se observa que el **STO** entre centralizadores < 60% en diversas partes del pozo, siendo la más crítica entre 5000-5200 ft donde el Max OD < diámetro del pozo (10.4") por lo tanto en base a los resultados obtenidos en la Figura 30 podemos seleccionar otro centralizador (tipo "E") con mayor **RF** y mayor **Max OD** para mejorar los dos tipos de **STO**

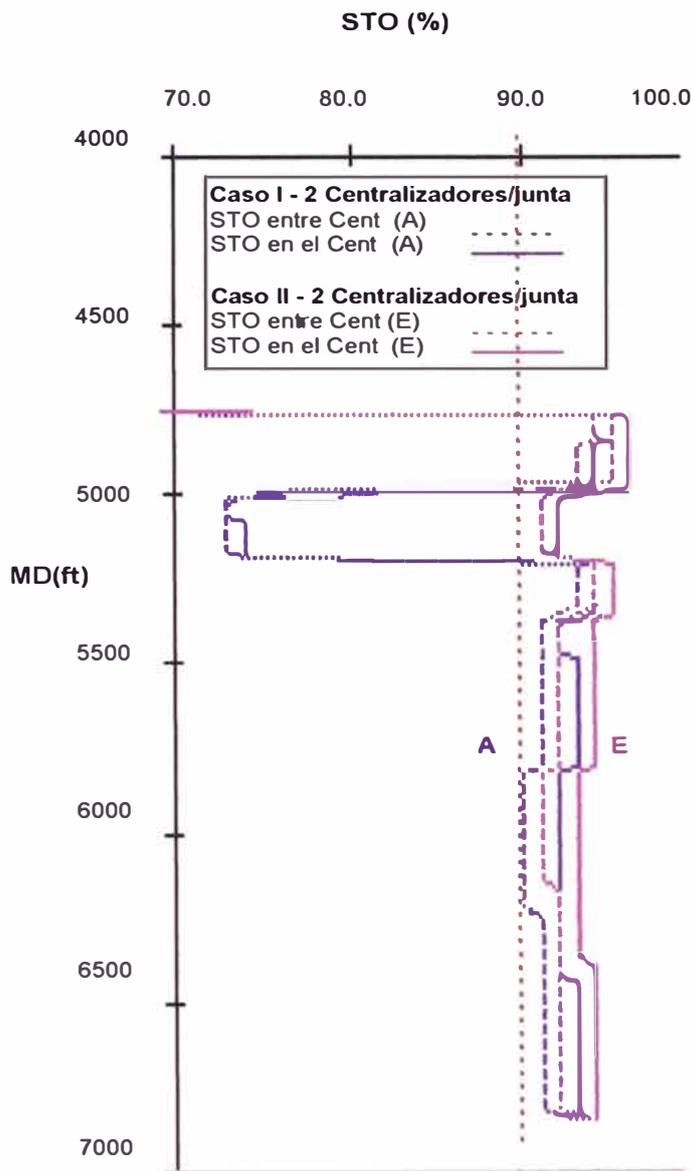
Caso	Tipo	Centraliz. por junta	Intervalo (ft)	ID	Max OD	Min OD	RF (Lbf)
I	E	1/1	4770-6858	9.875" 9.0"	10.180"	6.717"	1860 2050
II	A	1/1	4770-6858	9.0"	9.25"	6.5"	1750
III	A	1/1	4770-5000 OH=9.3"				
	E	1/1	5000-5200 OH=10.4"				
	A	1/1	5200-6858 OH=8.9"				



El uso del centralizador "E" solamente al igual que el uso de la combinación de "A" y "E" mejora grandemente los dos tipos de **STO** sobretodo para la zona de mayor diámetro (10.4") en el pozo.

Figura 31

Efecto del incremento de la densidad de centralizadores por junta en el STO



El uso de 2 centralizadores por junta(2/1) incrementa los dos tipos de **STO**. Encima de 90 % si se usan centralizadores tipo "E" y encima de 70 % si se usan centralizadores tipo "A".

Comparando las Figuras 31 y 32 se observa que el **STO** entre centralizadores es el que más se mejora con este incremento de la densidad de centralizadores

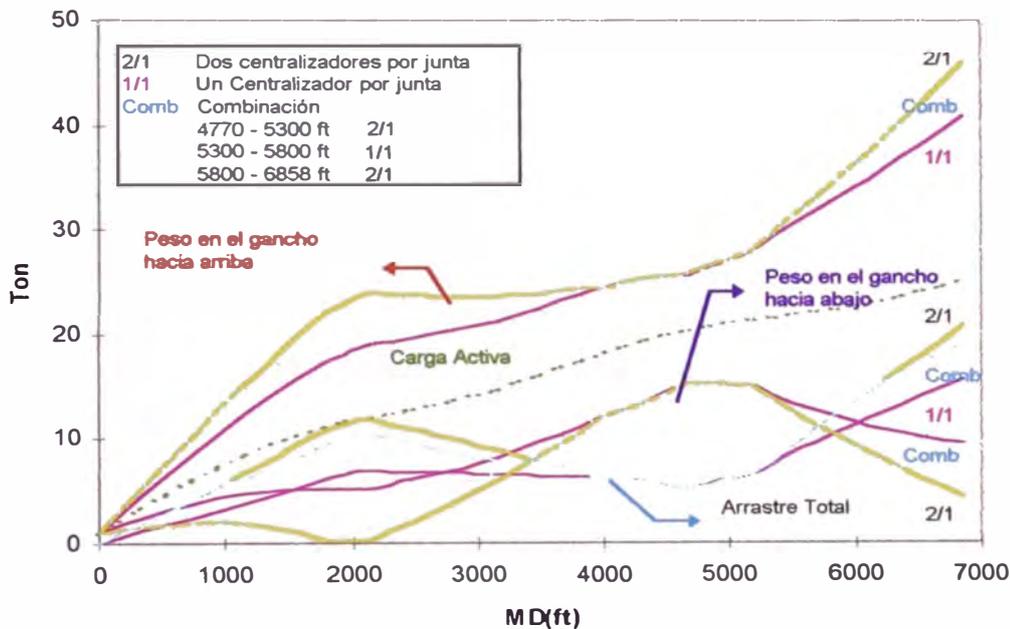
Figura 32

En base a las Figuras 31 y 32, la centralización óptima usaría 1 centralizador tipo "E"/junta, sin embargo por decisión de la compañía operadora sólo se tiene en stock el centralizador tipo "A" que como se demostró anteriormente no es el más adecuado para los diámetros promedio encontrados en la zona (**Max OD, RF**). Tomando en cuenta estas limitaciones, la segunda mejor opción es usar 2 centralizadores tipo "A" por junta (2/1) y simular si es posible la bajada de la tubería revestidora con esta centralización.

DISEÑO DE LA BAJADA DE LA TUBERIA REVESTIDORA

Usando 2 centralizadores "A" por junta (2/1) en toda la zona de interés (Figura 33), cerca a 2000 ft la curva que representa la "Carga Activa" se intersecta con la curva de "Arrastre Total" o lo que es igual, la curva de "Peso en el gancho hacia abajo" se hace casi "cero" generando una posibilidad de atascue a esta profundidad, lo cual indica que esta opción no es viable.

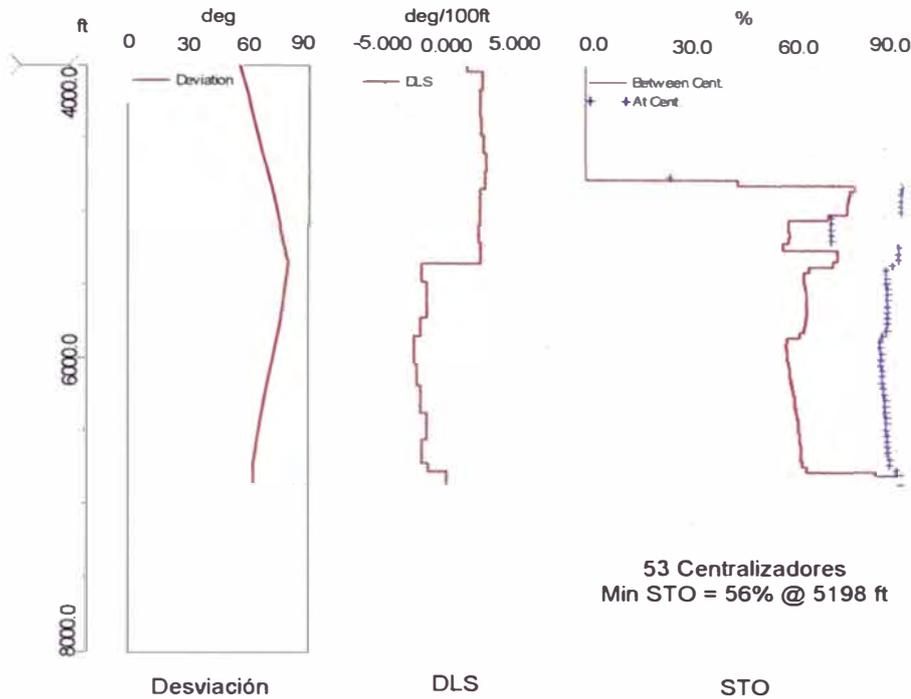
La mejor alternativa sería usar la "Combinación" ya que el "Peso en el gancho hacia abajo" es siempre mayor que "cero" hasta la profundidad final del pozo. Sin embargo esta opción también fué descartada debido a la alta desviación del pozo y limitaciones operativas relacionadas con la falta de anillos de retención.



(*) Se ha seleccionado un Factor de Fricción en el OH (μ) igual a 0.30, siendo el más adecuado para la zona.

Figura 33

Finalmente el número de centralizadores y los **STO** resultantes con 1 centralizador tipo "A" por junta (1/1) es el que se muestra en la Figura 34.



El **STO** entre centralizadores muestra valores más bajos debido a la poca densidad de centralizadores por junta en un pozo de alta desviación.

Figura 34

4.4 DISEÑO DE LOS CAUDALES DE FLUJO

En la zona de interés 4770ft - 6858 ft se seleccionaron los diferentes diámetros encontrados según el caliper (más su exceso), los menores **STO** en estos intervalos, y el máximo ángulo de desviación.

Intervalo (ft)	OH(pulg)	STO mín.
4770-5000	9.278	69 %
5000-5200	10.343	56 %
5200-6858	8.957	56%

Máximo ángulo de desviación : 81°

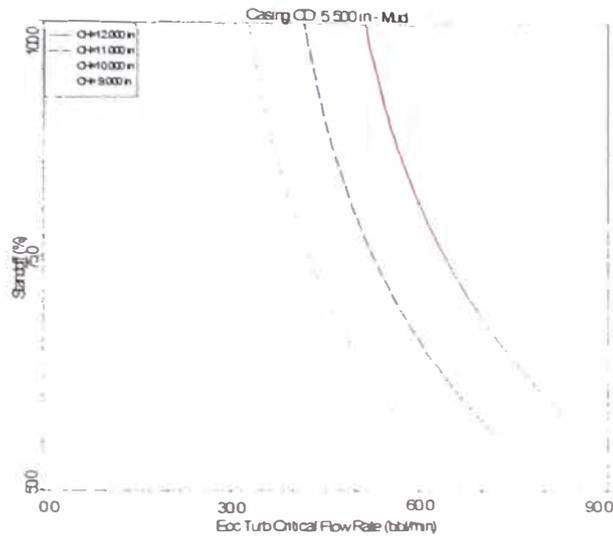
Adicionalmente se determinó el modelo reológico más adecuado para cada uno de los fluidos, considerando el lodo y las mezclas como fluidos Binham con el fin de tener un Q_{min} de diseño. Basados en estos datos se identificó el régimen de flujo a ser usado.

Lodo	10.5 ppg	$T_Y = 22.5 \text{ lbf//}100 \text{ ft}^2$	PV=37.5 cP	Binham
Lavador Químico	8.32 ppg	Viscosidad = 5 cP.		Newtoniano
Mezcla de relleno	14.1 ppg	$T_Y = 27 \text{ lbf//}100 \text{ ft}^2$	PV=54 cP	Binham
Mezcla principal	15.6 ppg	$T_Y = 30.5 \text{ lbf//}100 \text{ ft}^2$	PV=61.5 cP	Binham

A. Cálculo de los Caudales Críticos Q_{crit} para que todos los fluidos sean colocados en Flujo Turbulento

Lodo

Los caudales para alcanzar Turbulencia en el anular excéntrico son muy elevados por lo tanto no es posible el acondicionamiento del lodo previo a la cementación en Flujo Turbulento.



Casing OD 5.500 in Displacing Mud

Standoff: % Open Hole Size: in

%		9.000	9.300	10.300	10.500
100.0	Q_{crit}	24.9	27.2	35.3	37.1
75.0	Q_{crit}	33.0	35.7	45.2	47.3
69.0	Q_{crit}	36.3	[red]	49.3	51.5
56.0	Q_{crit}	[red]	50.4	[red]	65.2

bbf/min

Figura 35

Mezclas de cemento

Como se observa en la Figura 36, los caudales para tener turbulencia con las mezclas son todavía muy elevados aún con un $T_V=2$. Sabiendo que la reología de una mezcla de cemento "Clase A" para estas densidades no puede ser igual a $T_V=2$. Se puede concluir que no es posible colocar las mezclas de cemento en Flujo Turbulento, es necesario hacerlo en Flujo Laminar Efectivo.

$T_V=2$ Casing OD 5.500 in Displacing Lead Slurry

Standoff: % Open Hole Size: in

%		9.000	9.300	10.300	10.500
100.0	Q_{crit}	12.3	12.9	14.9	15.3
75.0	Q_{crit}	19.4	20.1	22.7	23.2
69.0	Q_{crit}	22.4	[red]	25.9	26.5
56.0	Q_{crit}	[red]	33.3	[red]	37.5

bbf/min

$T_V=2$ Casing OD 5.500 in Displacing Tail Slurry

Standoff: % Open Hole Size: in

%		9.000	9.300	10.300	10.500
100.0	Q_{crit}	12.4	13.0	14.9	15.3
75.0	Q_{crit}	19.7	20.4	22.3	22.4
69.0	Q_{crit}	22.8	[red]	26.2	26.9
56.0	Q_{crit}	[red]	33.9	[red]	38.1

bbf/min

Figura 36

Lavador Químico

Como se observa en la Figura 37:

- El Q_{crit} se incrementa a medida que el **STO** se reduce para un **OH** constante
- El Q_{crit} se incrementa a medida que el **OH** es más grande para un **STO** constante
- El ángulo de inclinación del pozo no tiene influencia en el Flujo Turbulento

Por lo tanto el Q_{crit} para toda la zona de interés (4770-6858 ft) puede ser obtenido de manera directa seleccionando el menor **STO** y a la vez el mayor **OH**.

Intervalo (ft)	OH(pulg)	STO min	Q_{crit} (bpm)
4770-5000	9.278	69 %	3.4 bpm
5000-5200	10.343	56 %	5.4 bpm
5200-6858	8.957	56%	4.9 bpm

Los valores mostrados en la tabla son los caudales mínimos (Q_{crit}) para alcanzar turbulencia al menor **STO** de cada intervalo respectivo, y a la vez aseguran turbulencia en todo el anular excéntrico (parte estrecha y ancha). El mayor Q_{crit} para toda la zona de interés es 5.4 bpm, este caudal si puede ser alcanzado fácilmente por con las bombas del equipo de Cementación.

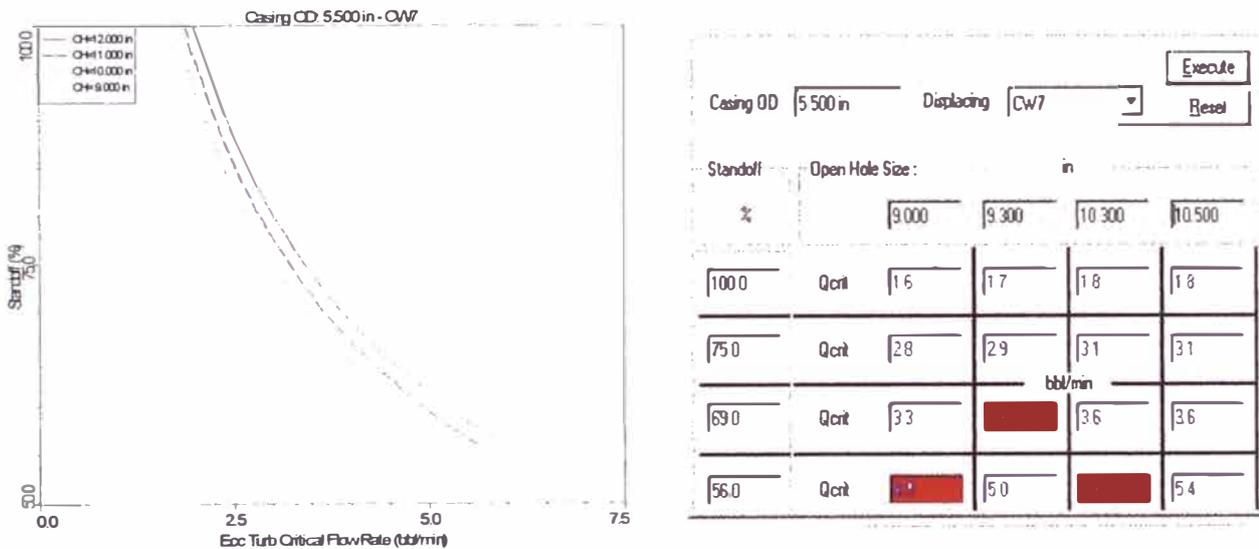


Figura 37

B. Cálculo de los Caudales Mínimos y Máximos para que el Lodo y las Mezclas de cemento sean colocadas en Flujo Laminar Efectivo (FLE)

Interpretación del gráfico de Flujo Laminar Efectivo Excéntrico

Para que los diferentes criterios del Flujo Laminar Efectivo (20 % Jerarquía de Presión por fricción, MPG, Velocidad Diferencial) sean cumplidos el caudal anular debe:

- Estar a la derecha de la curva de jerarquía mínima (Jerarquía de presión por fricción)
- Estar a la izquierda de la curva de jerarquía máxima (Jerarquía de presión por fricción)
- Encima de la curva de MPG (Mínimo gradiente de presión)
- Debajo y a la izquierda de la curva de Flujo Turbulento (Turbulencia del fluido desplazante)
- Encima y a la derecha de la curva de mínima estabilidad (Velocidad Diferencial)
- Encima y a la izquierda de la curva de máxima estabilidad (Velocidad Diferencial)

Lodo- Caudal Mínimo

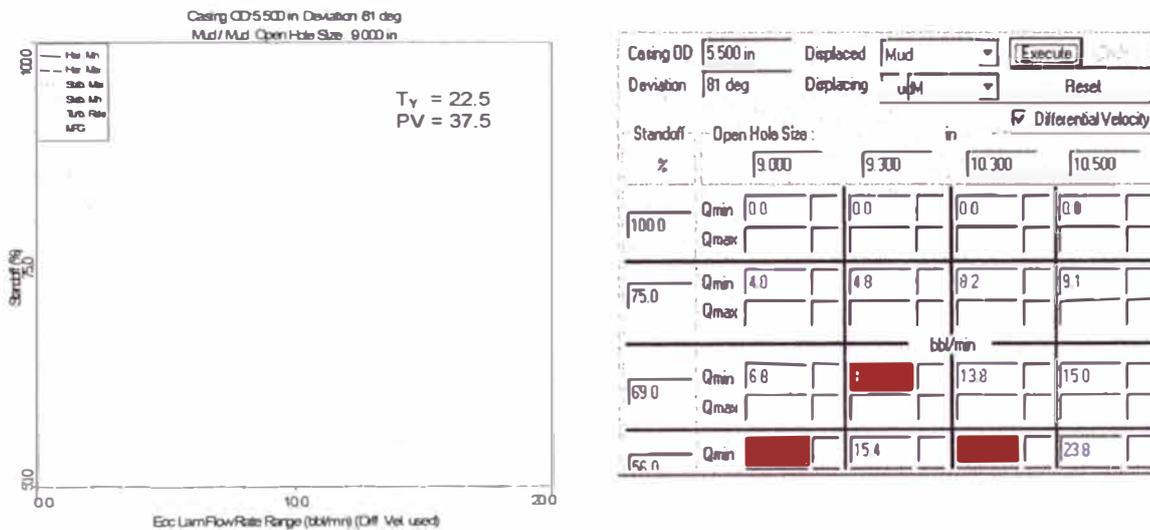
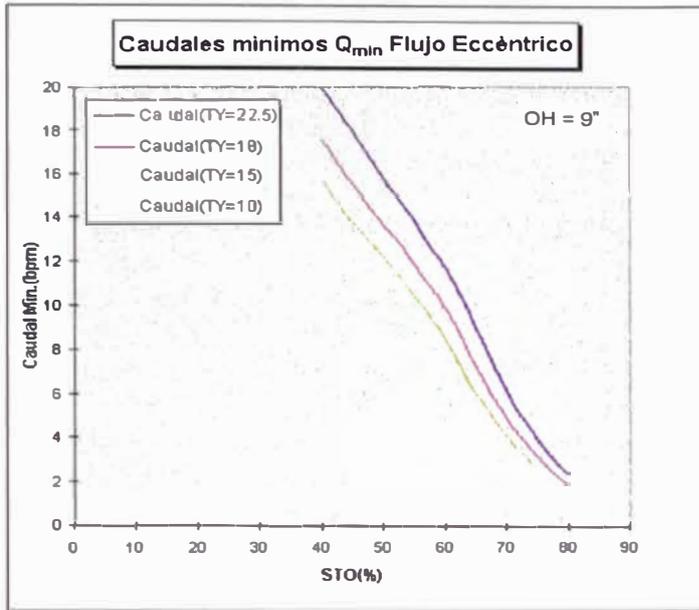


Figura 38

El desplazamiento de Lodo por Lodo, "dos fluidos iguales" en Flujo Laminar Efectivo no generará canalización y por lo tanto no se tendrá un caudal máximo Q_{max} . Además:

- El Q_{min} se incrementa a medida que el **STO** se reduce para un **OH** constante
- El Q_{min} se incrementa a medida que el **OH** es más grande para un **STO** constante.
Al incrementarse el **OH** el término " $(dP/dL)_2$ " (caída de presión por fricción) se reduce, siendo necesario incrementar el caudal para mantener la desigualdad ya que no existe un diferencial de densidades positivo.
- Para el cálculo del Q_{min} (Ecuación 5) si no existe una diferencia de densidades el ángulo de inclinación no tiene ningún efecto.

Como se observa en la Figura 38, los caudales mínimos son todavía muy altos. Como no se puede mejorar la centralización (aumentar el **STO**), es necesario reducir la reología del fluido desplazado (T_y lodo), con lo cual $(dP/dL)_2$ del fluido desplazante (lodo) no necesita ser un valor tan alto para cumplir la desigualdad, generando así una reducción del Q_{min} .



Para un **STO** dado, a menor reología del lodo(T_Y) el Q_{min} es menor

Es necesario tener en cuenta que la reología del lodo no puede ser reducida demasiado pues podría provocar la precipitación de recortes que aún se encuentran en suspensión. Para este caso específico la reología del lodo fué reducida de $T_Y=22.5$ a $T_Y=15$ manteniendo casi constante la viscosidad plástica.

Standoff %	Open Hole Size: in			
	8.957	9.300	10.400	10.500
100.0	Qmin: 0.0 Qmax:	0.0	0.0	0.0
69.0	Qmin: 4.4 Qmax:	5.4	9.7	10.1
56.0	Qmin: 6.8 Qmax:	11.6	17.7	18.3
50.0	Qmin: 12.1 Qmax:	13.9	20.6	21.3

Intervalo (ft)	OH (pulg)	STO min	Q_{min} (bpm)
4800-5000	9.278	69 %	5.4
5000-5200	10.343	56 %	17.7
5200-6858	8.957	56%	10.0

Figura 39

El mayor de los Q_{min} es 17.7 bpm. Acondicionando el lodo a este caudal, se asegura Flujo Laminar Efectivo en todo el anular excéntrico en toda la zona de interés (4770-6858 ft). Sin embargo este caudal es difícil de ser alcanzado incluso por las bombas del equipo de perforación.

Como ya no es posible mejorar la centralización y/o reducir más la reología del lodo, la única alternativa es acondicionar el Lodo al segundo caudal más alto 10 bpm con lo cual se conseguirá una completa remoción en los intervalos 4800-5000 ft y 5200-6858 ft.

Mezcla de Cemento- Caudal Mínimo y Caudal Máximo

Para este caso específico, si existe un 10 % de diferencia de densidades entre el lodo (10.5 ppg), mezcla de relleno (14.1 ppg) y mezcla principal (15.6 ppg). Además la reología del lodo es menor que la reología de la mezcla de relleno y esta a su vez es menor que la reología de la mezcla principal.

Desplazamiento en FLE entre el Lodo y la Mezcla de relleno

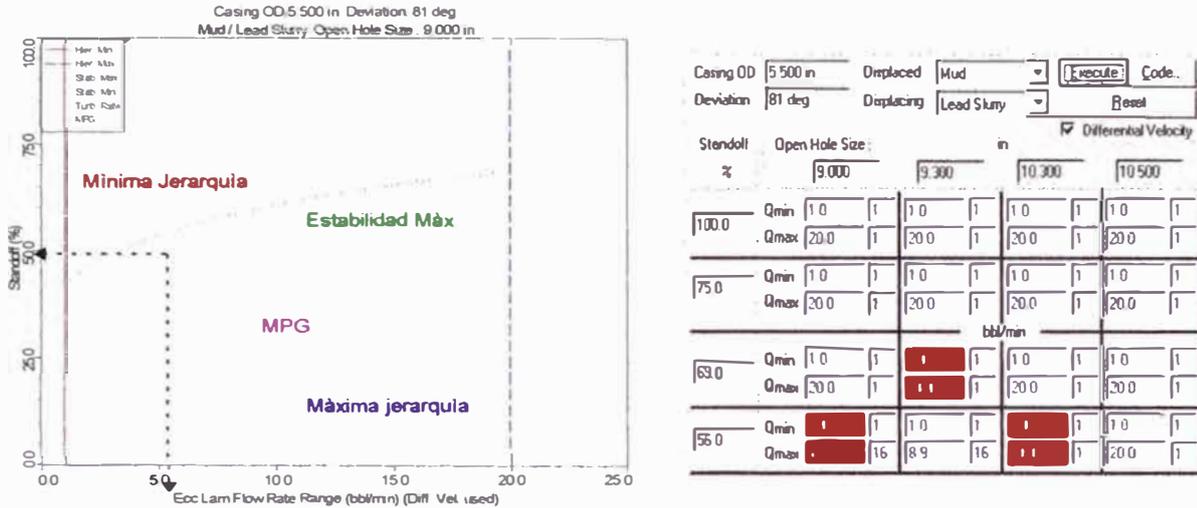


Figura 40

Desplazamiento en FLE entre el Lodo y la Mezcla principal

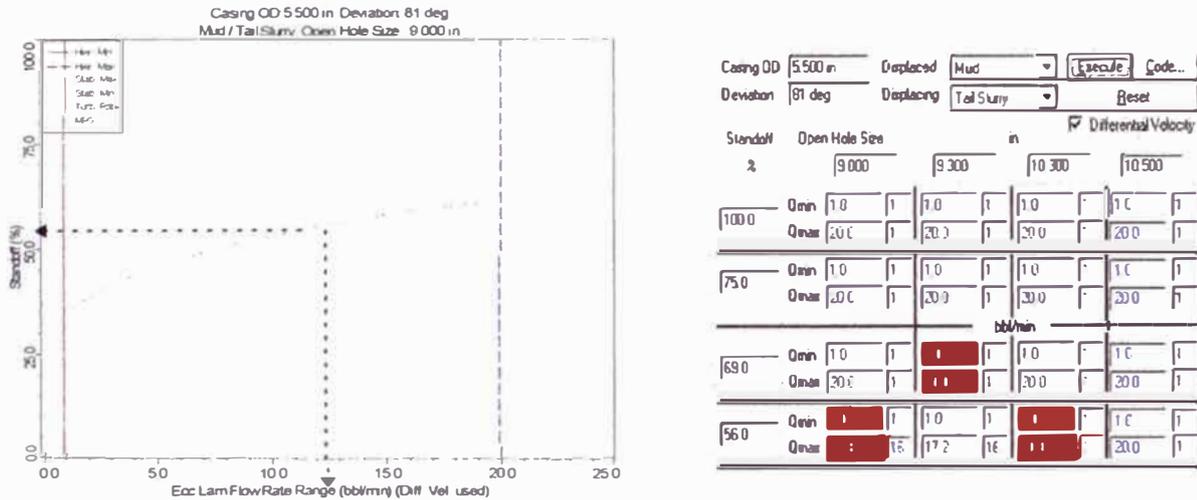
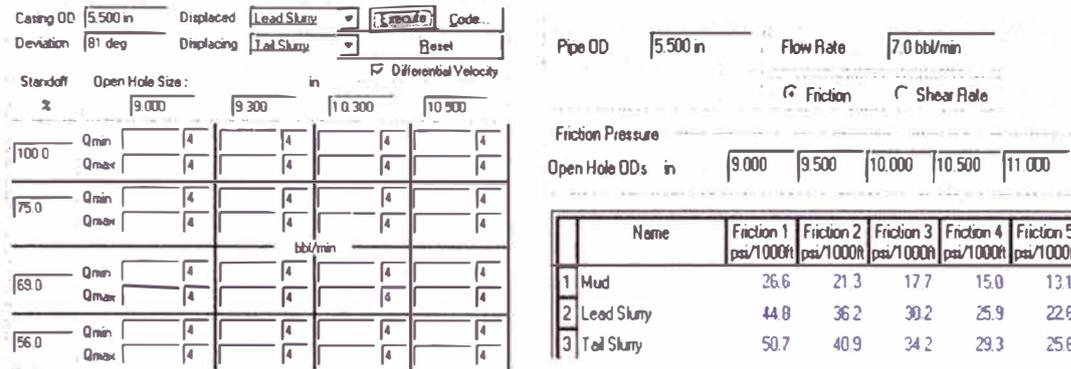


Figura 41

Como se observa en las Figuras 40 y 41, si existe un rango de caudales Q_{max} y Q_{min} para los desplazamientos Lodo-Mezcla de relleno y Lodo-Mezcla principal.

Desplazamiento en FLE entre la Mezcla de relleno y la Mezcla principal



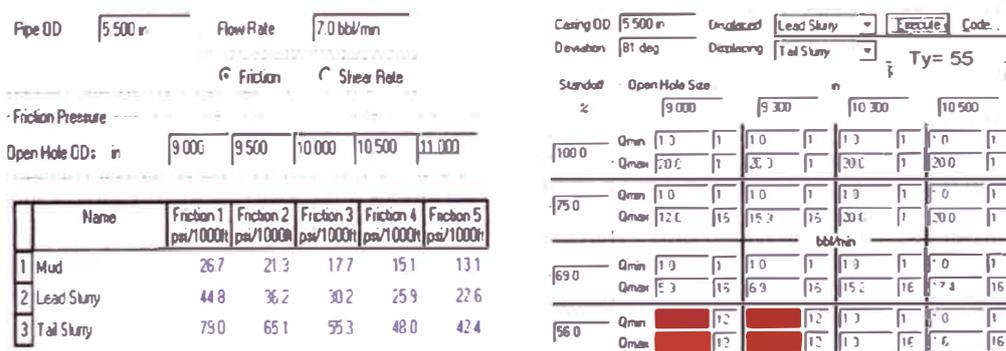
(*) El código 4 indica que no existe 20% dP

Figura 42

La Figura 42 muestra que no existe un rango de caudales para el desplazamiento entre las mezclas porque el criterio de Jerarquía de presión por Fricción no se cumple. Lo cual implica que las mezclas podrán remover el Lodo en FLE, pero puede existir contaminación entre las dos mezclas durante su desplazamiento, y se corre el riesgo de deteriorar las propiedades del cemento situado frente a la zona de interés.

Analizando más detalladamente el desplazamiento entre las mezclas, se observa que sólo existe un 20% de diferencia de presión por fricción entre el Lodo-Mezcla de relleno, y entre el Lodo-Mezcla principal, pero no entre las mezclas para los diferentes OH encontrados en el pozo. Además, es importante notar que la diferencia de presión por fricción entre los fluidos se reduce a medida que el OH aumenta, lo cual es un factor muy importante que hace también difícil el desplazamiento en FLE para las zonas muy fuera de calibre ("washouts").

Para obtener un rango de caudales mínimo y máximo en el desplazamiento entre estas dos mezclas, es necesario incrementar la reología de la mezcla principal de $T_Y=30.5$, $PV=61.5$ a $T_Y=55$, $PV=60$ con el fin de satisfacer el criterio de Jerarquía de presión por Fricción (20%).



(*) El código 16 indica que el caudal máximo se ha alcanzado debido al criterio de máxima velocidad diferencial

Figura 43

En la Figura 43 se observa que el Q_{max} es muy cercano al Q_{min} y esto se hace más crítico a bajos STO y pequeños OH. Para contrarrestar esta limitación del Q_{max} debido al Criterio de máxima velocidad Diferencial se puede:

⇒ **Mejorar la centralización (aumentar el STO) con el fin de homogenizar el ancho de los canales de flujo en el anular**

Con un **STO > 75%** si existe un rango amplio de caudales para el desplazamiento entre las mezclas (Figura 43), sin embargo esto no es posible debido a limitaciones operativas.

⇒ **Incrementar más la reología del fluido desplazante ($T_y = 55$) con el fin de reducir su facilidad de flujo en la zona ancha del anular excéntrico**

$T_y = 80$

Standoff %	Open Hole Size in							
	9.000	9.300	10.300	10.500				
100.0	Qmin: 1.0	1.0	1.0	1.0	Qmax: 20.0	20.0	20.0	20.0
	bbbl/min							
75.0	Qmin: 1.0	1.0	1.0	1.0	Qmax: 20.0	20.0	20.0	20.0
	bbbl/min							
69.0	Qmin: 1.0	1.0	1.0	1.0	Qmax: 15.9	16	19.8	16
	bbbl/min							
56.0	Qmin: 1.0	1.0	1.0	1.0	Qmax: 3.3	16	4.2	16
	bbbl/min							

$T_y = 100$

Standoff %	Open Hole Size in							
	9.000	9.300	10.300	10.500				
100.0	Qmin: 1.0	1.0	1.0	1.0	Qmax: 20.0	20.0	20.0	20.0
	bbbl/min							
75.0	Qmin: 1.0	1.0	1.0	1.0	Qmax: 20.0	20.0	20.0	20.0
	bbbl/min							
69.0	Qmin: 1.0	1.0	1.0	1.0	Qmax: 20.0	20.0	20.0	20.0
	bbbl/min							
56.0	Qmin: 1.0	1.0	1.0	1.0	Qmax: 7.0	16	8.7	16
	bbbl/min							

(*) El código 16 indica que el caudal máximo se debe al criterio de máxima velocidad diferencial

De los dos últimos gráficos se puede concluir que aumentando la reología del fluido desplazante se puede ampliar el rango de caudales cuando estos están limitados por el criterio de velocidad diferencial. Para este caso específico una mezcla de cemento con $T_y=100$ sería muy costosa por la cantidad de aditivos necesarios para incrementar la reología, además puede generar un problema de mezcla en la parte operativa.

⇒ **Reducir la reología del fluido desplazado (Mezcla de relleno $T_y = 27$) con el fin de facilitar su desplazamiento**

$T_y = 20$

Standoff %	Open Hole Size in							
	9.000	9.300	10.300	10.500				
100.0	Qmin: 1.0	1.0	1.0	1.0	Qmax: 20.0	20.0	20.0	20.0
	bbbl/min							
75.0	Qmin: 1.0	1.0	1.0	1.0	Qmax: 20.0	20.0	20.0	20.0
	bbbl/min							
69.0	Qmin: 1.0	1.0	1.0	1.0	Qmax: 11.5	16	14.5	16
	bbbl/min							
56.0	Qmin: 1.0	1.0	1.0	1.0	Qmax: 7.3	16	8.4	16
	bbbl/min							

(*) El código 16 indica que el caudal máximo se ha alcanzado debido al criterio de máxima velocidad diferencial

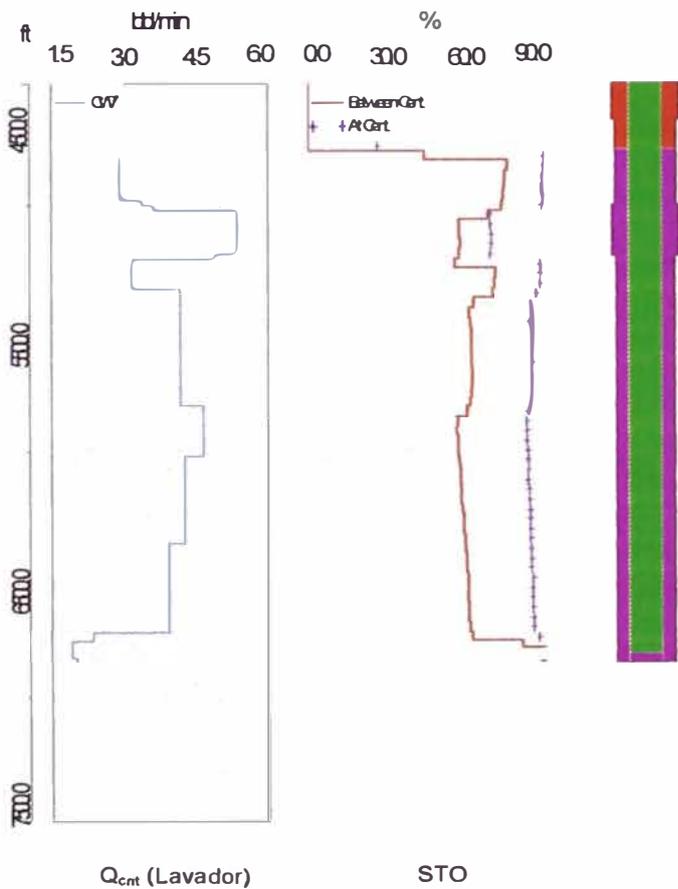
Como se puede ver una reducción de la reología del fluido desplazado (Mezcla de relleno), mejora un poco el desplazamiento entre las mezclas. Sin embargo como se muestra en la Figura 40 el rango de caudales para el desplazamiento entre el Lodo y la Mezcla de relleno se reduciría aún más ya que estos también están limitados por el criterio de velocidad diferencial comprometiendo así la eficiencia de la remoción del lodo por la mezcla de relleno, lo cual no es conveniente.

Finalmente se puede concluir que la mejor opción disponible es modificar solo la reología de la Mezcla principal pero solo a un valor de $T_V=55$ tratando de mantener una interface plana y estable entre las mezclas cumpliendo el criterio de Diferencial de Densidad y Jerarquía de Presión por Fricción aunque los rangos de caudal obtenidos para OH 9" y 9.3" con STO entre 69% y 56% sean muy limitados y no factibles.

C. Cálculo exacto de los caudales: Crítico, Mínimo y Máximo

En las Figuras anteriores se observa que tanto el Q_{crit} , Q_{min} y Q_{max} dependen mucho del STO. En la zona no centralizada comprendida entre 1550-4770 ft donde los dos tipos de STO tienden a cero, tanto el acondicionamiento del lodo previo a la cementación como el desplazamiento de los fluidos durante la cementación no es posible ni en Flujo Laminar Efectivo ni en Flujo Turbulento. En esta zona existirá una mezcla de Fluidos aún cuando se pongan centralizadores entre las tuberías de 9 5/8" y 5 1/2" (1550-1872 ft).

Flujo Turbulento- Q_{crit} para el Lavador Químico



“El Q_{crit} es mayor a menor STO”

El Mínimo caudal anular que asegura Flujo Turbulento a través de toda la zona de interés es:

$Q_{crit} = 5.4 \text{ bpm @ } 5200 \text{ ft}$

Figura 44

Flujo Laminar Efectivo (FLE) - Q_{min} y Q_{max} para el desplazamiento del Lodo por las Mezclas

La selección exacta del Q_{min} y Q_{max} para el desplazamiento en FLE de "dos fluidos distintos" es compleja y depende de varias variables (OH, STO, θ)

Variación del Q_{min} :

- A muy bajos STO, cuando existe un diferencial de densidades positivo y un ángulo pequeño, el Q_{min} es un valor pequeño. A medida que el ángulo se incrementa el diferencial de densidad tiene menos influencia y el Q_{min} debe crecer.

$$\left(\frac{dP}{dL}\right)_2 + (\rho_2 - \rho_1) \cos \theta > 4T_y / [STO(D_0 - D_i)] \longrightarrow Q_{min}$$

Variación del Q_{max} :

- El Q_{max} se reduce a medida que el STO se reduce para un OH constante
- El Q_{max} se reduce a medida que el OH se reduce para un STO constante
- El Q_{max} se reduce al aumentar el ángulo para un STO constante

$$\underbrace{\rho_1 g \cos \theta + (dP / dL)_1}_{\text{Fluido Desplazado}} \leq \underbrace{\rho_2 g \cos \theta + (dP / dL)_2}_{\text{Fluido Desplazante}} \longrightarrow Q_{max}$$

El Q_{max} es el mayor caudal en el cual todavía existe mayor facilidad de flujo en la zona estrecha (1 fluido desplazado) porque tiene menor Presión Dinámica. Cuando el ángulo es pequeño la diferencia de presiones hidrostáticas ayuda a mantener esta desigualdad y el Q_{max} puede ser grande. A medida que el ángulo se incrementa las presiones hidrostáticas se hacen negligibles, y la desigualdad se mantendrá inicialmente solo por la diferencia de reologías. Sin embargo a medida que se incrementa el caudal la presión por fricción en la parte estrecha (1) se vuelve mayor que en la parte ancha (2) a pesar de tener menor reología, limitando así el Q_{max} .

Deviation: 51 deg				Deviation: 89 deg				
Standoff %	Open Hole Size		Standoff %	Open Hole Size		Standoff %	Open Hole Size	
	9.000	9.300		9.000	9.300		9.000	9.300
90.0	Q_{min}	1.0	1.0	Q_{min}	1.0	1.0	Q_{min}	1.0
	Q_{max}	20.0	20.0	Q_{max}	20.0	20.0	Q_{max}	20.0
80.0	Q_{min}	1.0	1.0	Q_{min}	1.0	1.0	Q_{min}	1.0
	Q_{max}	20.0	20.0	Q_{max}	12.4	15.6	Q_{max}	16
75.0	Q_{min}	1.0	1.0	Q_{min}	1.0	1.0	Q_{min}	1.0
	Q_{max}	1.1	20.0	Q_{max}	4.4	5.6	Q_{max}	16
70.0	Q_{min}	1.0	1.0	Q_{min}	1.0	1.0	Q_{min}	1.0
	Q_{max}	1.1	20.0	Q_{max}	1.1	1.5	Q_{max}	16

Si θ es grande, aún para valores de STO elevados el Q_{max} es pequeño

En un pozo vertical la diferencia de densidades tendrá mucha influencia en la determinación del Q_{min} y del Q_{max} , mientras que en un pozo Horizontal ó altamente desviado, mantener la jerarquía de presión por fricción y un STO aún más alto que en un pozo vertical son más importantes.

El rango más crítico para el desplazamiento entre el Lodo y las Mezclas (relleno y principal) se ha obtenido en la sección B tomando el mayor ángulo de inclinación (Figuras 40 y 41) $Q_{min} = 1 \text{ bpm}$ y $Q_{max} = 6.4 \text{ bpm}$. Por lo tanto ya con el ángulo correspondiente a cada profundidad este rango será aún más grande.

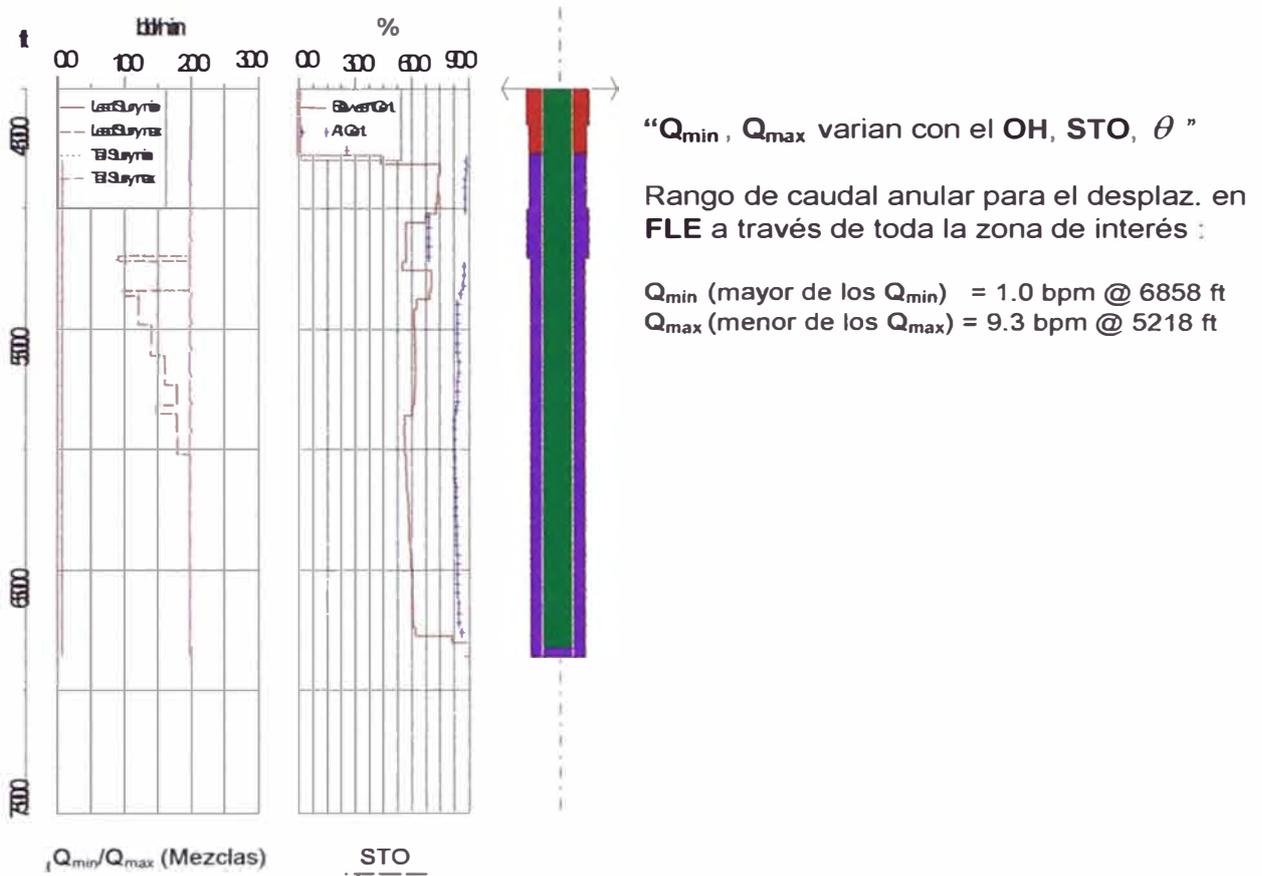
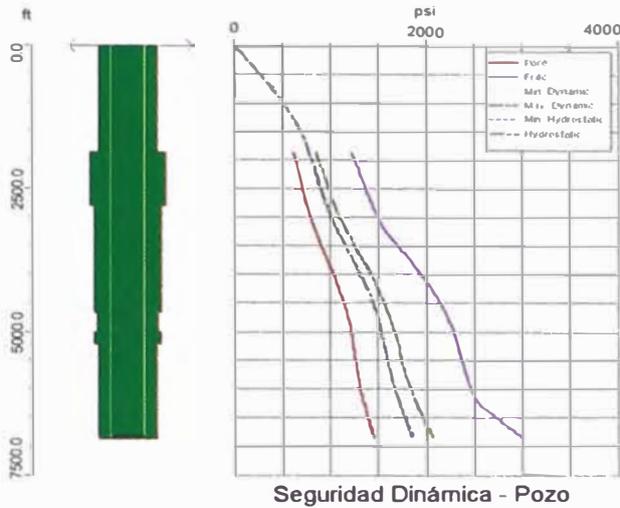


Figura 45

Si las dos mezclas son colocadas en el anular entre estos dos límites se asegura una buena remoción del Lodo en FLE en toda la zona de interés (4770-6858 ft). La idea de Bombear tan rápido como sea posible, a un caudal mayor que el Q_{max} solo producirá la formación de un canal en el anular.

4.5 SIMULACION DEL PROCESO DE BOMBEO DE FLUIDOS

Acondicionamiento del Lodo



Las presiones dinámicas en el pozo @ 17 bpm (Q_{min} que asegura FLE del Lodo en toda la zona de interés) están lejos de la presión de fractura como se muestra en la Figura 45. Por lo tanto si no es posible acondicionar el Lodo a 17 bpm por limitaciones en las bombas del equipo de perforación, al hacerlo a 10 bpm no existirá ningún problema.

Figura 45

Simulación de los caudales para la cementación

$Q_{crit} = 5.4 \text{ bpm @ } 5200 \text{ ft}$

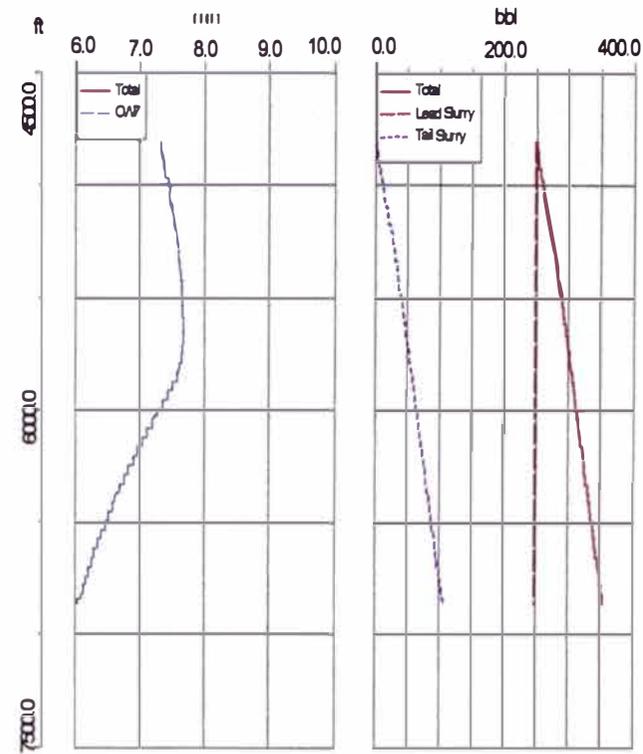
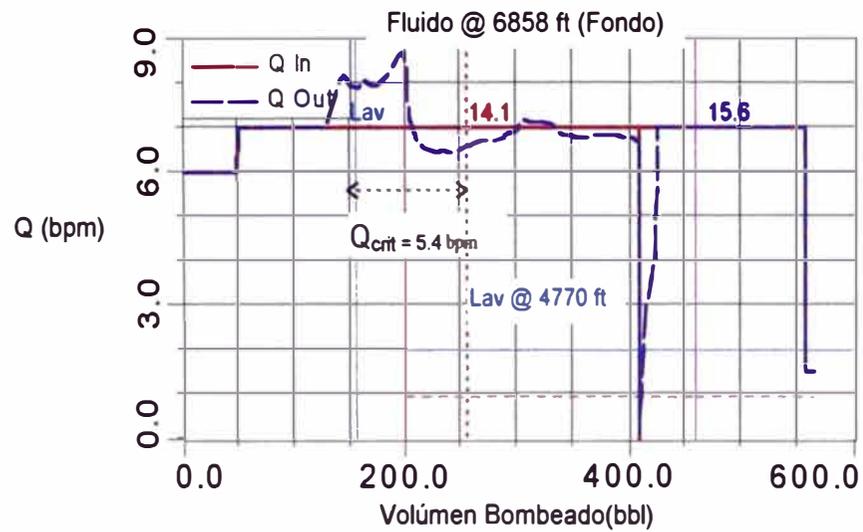
$Q_{min} = 1.0 \text{ bpm @ } 6858 \text{ ft}$

$Q_{max} = 9.3 \text{ bpm @ } 5218 \text{ ft}$

Comenzamos la simulación a un caudal mayor que el Q_{crit} y dentro del rango para FLE. En la Figura 46 se observa que el caudal de retorno Q_{out} es mucho mayor que el Q_{crit} . Además debido al efecto de tubo en "U" el Q_{out} es muy cercano al $Q_{máx}$. El Tiempo de Contacto es menor que 7 min. en algunas partes de la zona de interés mientras que el Volúmen Efectivo en Flujo Laminar es casi igual al volúmen de las mezclas.

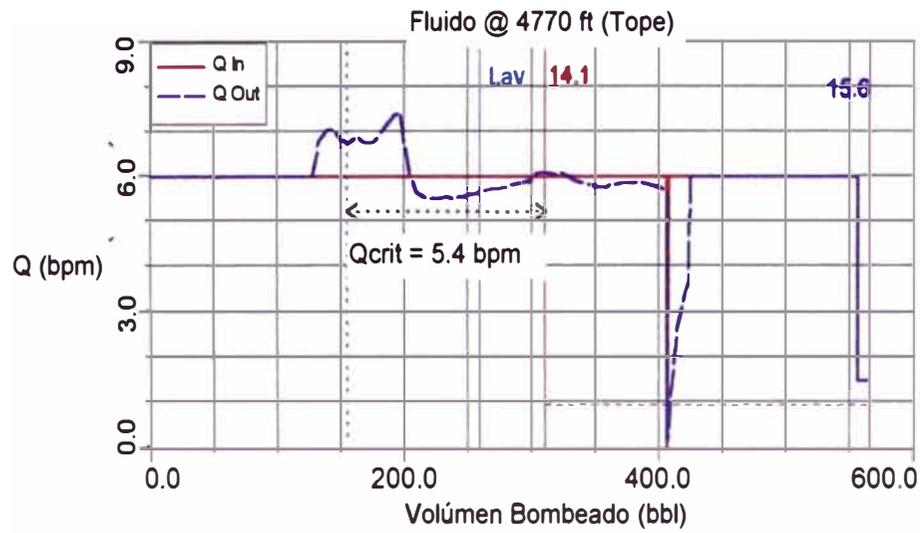
Con el fin de incrementar el Tiempo de contacto sin incrementar el volúmen de Lavador, se redujo el caudal de bombeo (Figura 47). Bajo estas condiciones, el Q_{out} sigue siendo mayor que el Q_{crit} , pero está más lejos del Q_{max} (debido a la reducción del Q_{in} durante la etapa de caída libre). El Tiempo de Contacto es mayor que 7 min en toda la zona de interés 4770-6858 ft y el Volúmen Efectivo es el mismo que en el caso anterior.

La realización del trabajo entre estas dos secuencias de bombeo es la más recomendable. Las presiones hidrostáticas y las presiones dinámicas se encuentran dentro de los márgenes de presión poral y de fractura, y en ningún momento se excede la presión de colapso o la presión de ruptura de la tubería. Además la presión de superficie está dentro de los límites del equipo de cementación.

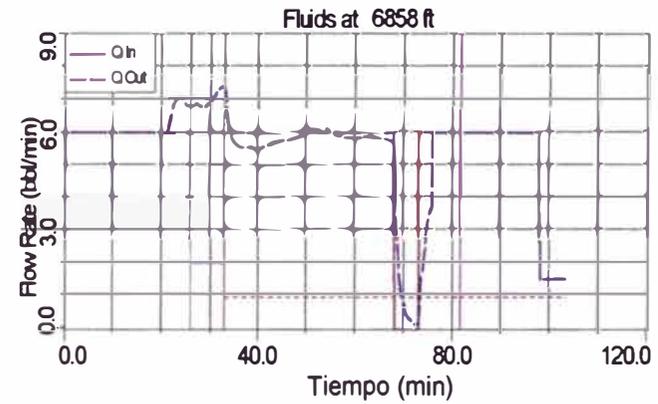
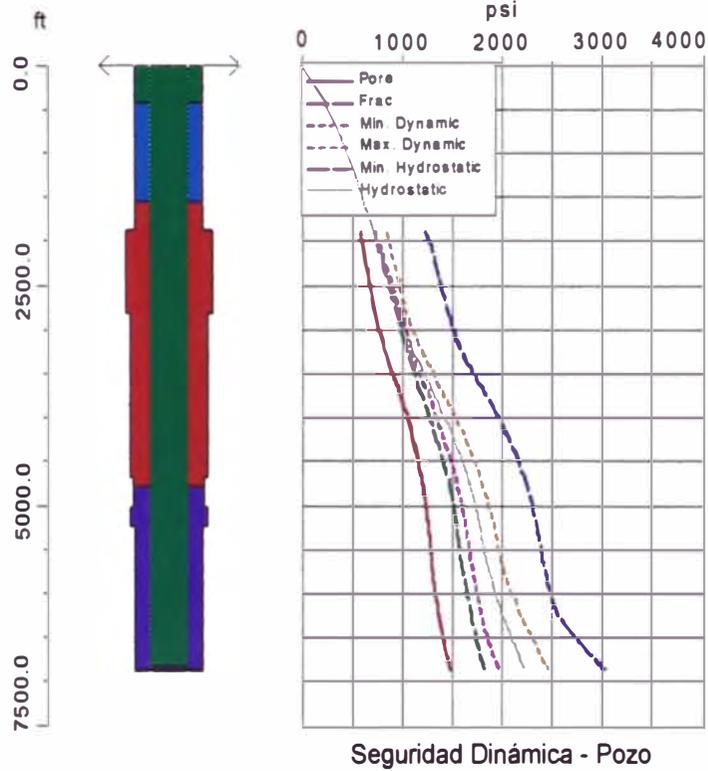


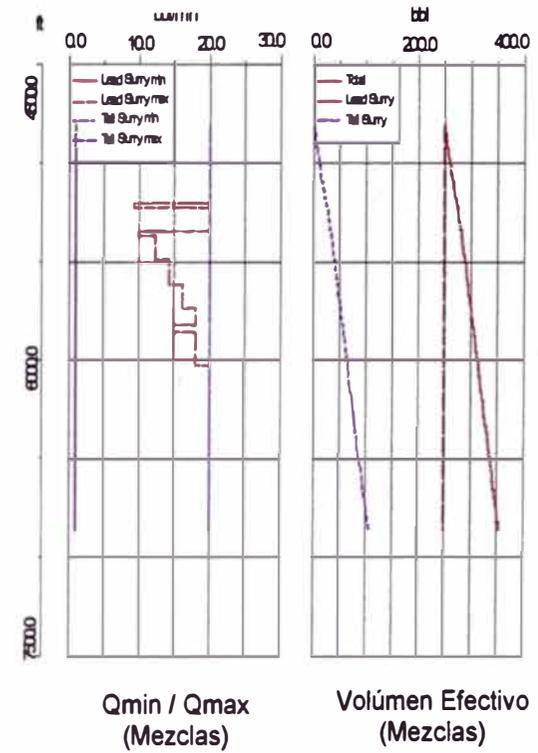
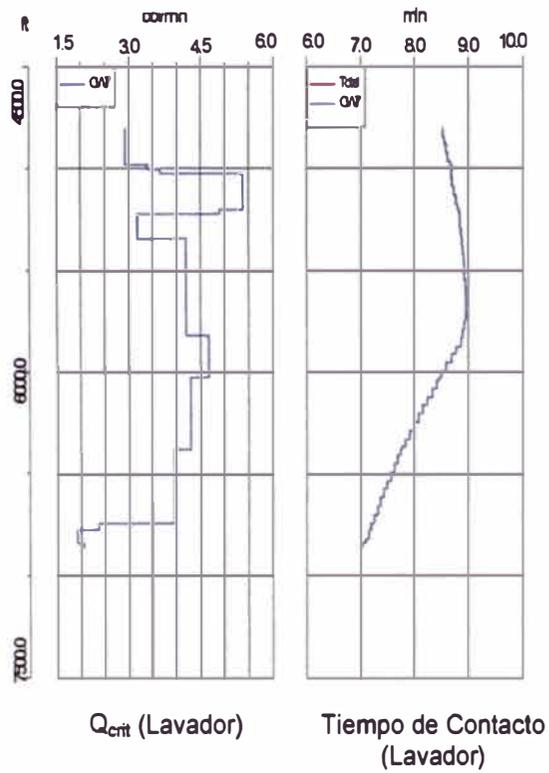
Fluido bombeado	Volúmen (bbl)	Caudal (bbl/min)	Tiempo (min)
Lavador Químico	50	6	8.3
Mezcla de relleno	249	7	35.6
Mezcla principal	109	7	15.5
Tapon Sup.		0	5.0
Lodo	150	7	21.4
Lodo	8.5	1.5	5.7

Figura 46



Fluido bombeado	Volúmen (bbl)	Caudal (bbl/min)	Tiempo (min)
Lavador Químico	50	6	8.3
Mezcla de relleno	249	6	41.5
Mezcla principal	109	6	18.1
Tapon Sup.		0	5.0
Lodo	150	6	25
Lodo	8.5	1.5	5.7





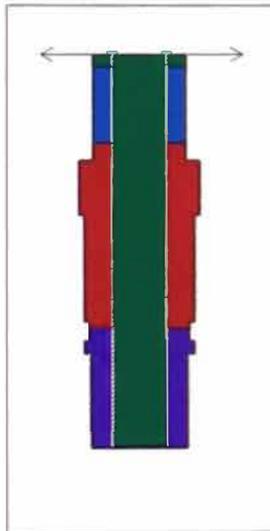
Fluido	Flujo Turbulento			
	Max.(Qcrit) (bbl/min)	@ (MD) (ft)	Min. Contact Time (min)	@ Depth. (ft)
CW7	5.4	5200.0	7.0	6838.0

Fluido	Flujo Laminar Efectivo					
	Max. (Qmin) (bbl/min)	@ (MD) (ft)	Min. (Qmax) (bbl/min)	@ (MD) (ft)	Min. volúmen Efectivo. (bbl)	@ Prof. (ft)
Mezcla de relleno	1.0	6858	9.3	5218.0	247.7	5005.0
Mezcla Principal	1.0	6858	20.0	6858.0	1.6	4800.0

Figura 47

4.6 PROGRAMA FINAL DE CEMENTACION Y ACONDICIONAMIENTO DE LODO

POZO	DESVIADO	PROFUNDIDAD	6858 FT	TUBERIA OD (in)	5 1/2"
COMPANIA	NOROESTE	ZAPATO	6858 FT	LINER OD (in)	
CAMPO		COLLAR	6818 FT		
EQUIPO		TOPE CEMENTO	1550 FT		
RELLENO		PRINCIPAL		ESPACIADORES & LAVADORES	
Volúmen (bbl)	249		109		
Tipo de cemento	A		A		
Cemento (sx)	907		523	1430	
Aditivos					
Sólidos		%	Lb	%	Lb
D065	Dispersante	0.3	255.774	0.25	122.9
D160	Contr.Filtrado		0	0.52	255.6
D112	Contr.Filtrado	0.4	341.032		0
D800	Retardador		0		0
D020	Extendedor	4	3410.32		0
D153	Antisedim.	0.1	85.258	0.2	98.32
S001	Acelerador		0		0
D013	Retardador		0	0.2	98.32
Líquido		gal/sx	Gal	gal/sx	Gal
D144	Antiespumante		0		0
D047	Antiespumante	0.006	5.442	0.006	3.138
D110	Retardador		0		0
D075	Extendedor		0		0
Agua		7.6	ga/sx	5.2	ga/sx
Vol. Agua		164.124	bbl	84.752	bbl
Rendimiento		1.54	Ft ³ /sx	1.17	Ft ³ /sx
Density		14.1	ppg	15.6	ppg
TT(70 BC)		3.50	Hr:min	2.35	Hr:min
LAVADOR QUIMICO					
VOL		50	bbl		
D122A		25	gal	Densidad	8.32 ppg
U066		15	bbl		
AGUA		50	bbl		
ESPACEADOR					
VOL			bbl		
D149			lb	Densidad	ppg
D031			Sx(100 lb)		
D144			gal		
AGUA			bbl		
CONTROLADOR DE PERDIDA					
VOL			bbl		
D075			gal	Densidad	ppg
S001			lb		
AGUA			bbl		
SECUENCIA DE BOMBEO					
FLUIDO	VOL	DENS.	CAUDAL	COMENT.	
	bbl	ppg	bbl/m		
					TAPON INF.
Lavador	50	8.32	6		
M.Relleno	249	14.1	6		
M.Principal	109	15.6	6		
					TAPON SUP.
Lodo	150	10.5	6		
Lodo	8.5	10.5	1.5		LLEGADA TAPON
Tiempo Op. = 1:45 hr					
PRESIONES					
Prueba de líneas			2500 psi		
Llegada Tapón			650 psi		
Presión Final			1200 psi		
PROGRAMA DE CENTRALIZACION					
Dens.	Tipo	De(ft)	A(ft)	Cantidad	
1/1	Flexible	4770	6858	53	
Recomendaciones :					
1. Terminada al entubación, acondicionar el Lodo hasta TY=15			4. Verificar en todo momento el retomo de fluidos a superficie		
2. Circular el Lodo hasta que los valores reológicos en la entrada sean los mismos que a la salida del pozo			5. Antes de la llegada del tapón reducir el caudal @1.5 bpm		
3. Circular dos volúmenes de pozo como mínimo @10 bpm			6. La máxima sobrepresión debe ser de 500 psi		
4. Reciprocarse la tubería durante el acondicionamiento y cementación			7. Liberar presión después de 5min, chequear el collar flotador		
			(*) Probar el agua de mezcla en el campo, seleccionar muestras		



- @ 441 ft
 - @ 1550 ft
 - @ 4770 ft
 - @ 6858 ft
- Lodo
 - Lavador
 - M. Relleno
 - M. principal

5. EVALUACION

5.1 EVALUACION COMPARATIVA DEL TRABAJO DE CEMENTACION REAL VS. EL DISEÑO

La comparacion gráfica entre los datos obtenidos de la ejecución del trabajo y los resultados de la simulación (diseño) proporcionan una base para la una evaluación final exitosa.

APLICACION DEL METODO A POZOS ALTAMENTE DESVIADOS - NOROESTE

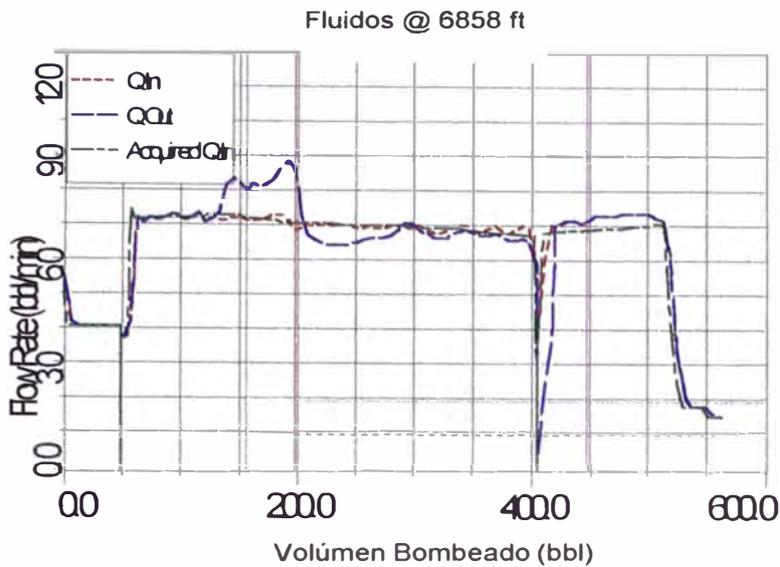
Ejecución del trabajo de cementación

- La centralización fué de acuerdo al diseno
- Se redujo la reología del lodo a $Ty= 15$, se circularon dos volúmenes de pozo @12 bpm y se reciproco durante el acondicionamiento y durante la cementación.
- No hubo problemas de pérdida de circulación, ni entrada de fluidos al pozo. La densidad no varió significativamente.

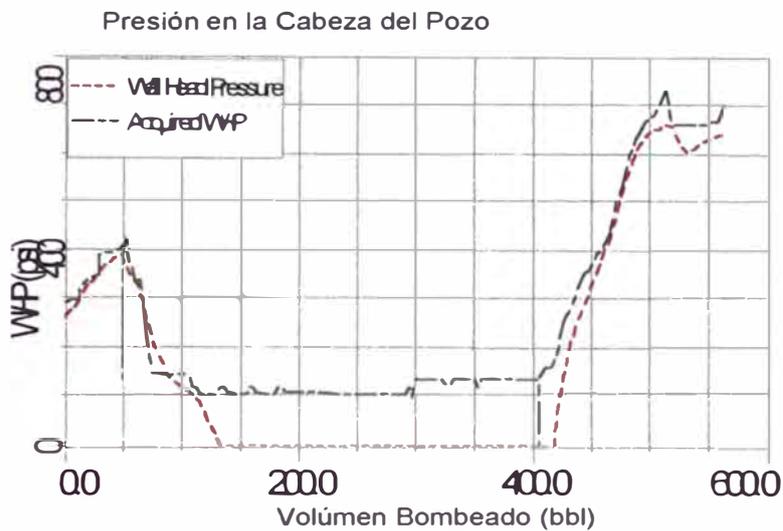
El registro de presión, volúmen, densidad y caudal de bombeo (Q_{in}), se muestra a continuación:

Fluid Sequence									
	Name	TP	Start Time hr:mr:sc	Stop Time hr:mr:sc	Time min	Acq. Vol bbl	Volume bbl	Design Density lb/gal	Acq. Density lb/gal
1	CW7	<input type="checkbox"/>	20:23:02	20:35:03	12.0	49.6	49.6	8.32	8.32
2	Lead Slurry	<input type="checkbox"/>	20:40:45	21:16:17	35.5	247.9	247.9	14.10	14.18
3	Tail Slurry	<input type="checkbox"/>	21:16:17	21:32:07	15.8	108.0	108.0	15.60	15.52
4	Mud	<input checked="" type="checkbox"/>	21:38:00	22:06:02	28.0	155.4	158.5	10.50	10.50

Pumping						
		Displacement	Total	Pump. Time		
		158.5 bbl	564.0 bbl	01:43 hr:mn		
	Name	Time min	Acq. Rate bbl/min	Acq. Min. Rate bbl/min	Acq. Max. Rate bbl/min	▲
1	CW7	12.0	4.1	4.0	5.6	
2	Pause	5.7	0.0	0.0	4.1	
3	Lead Slurry	35.5	7.0	3.8	7.6	
4	Tail Slurry	15.8	6.8	2.3	7.2	
5	Pause	5.9	0.6	0.0	3.4	
6	Mud	28.0	5.5	1.5	7.5	



El caudal de bombeo real es muy cercano al del diseño

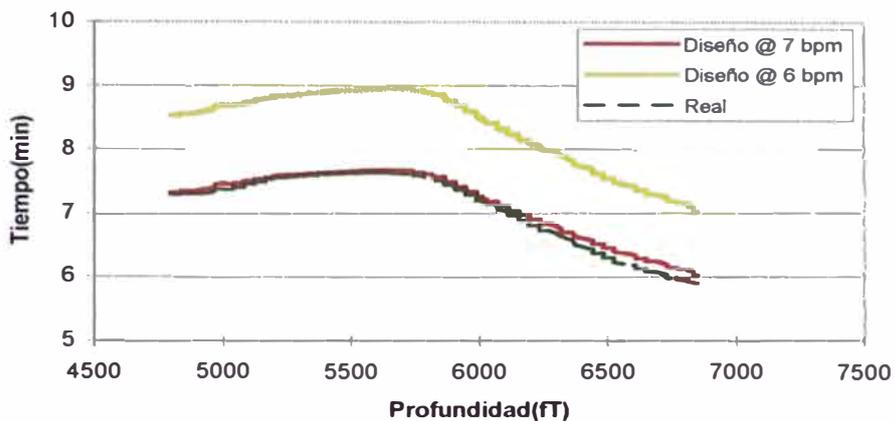


La presión real en superficie varía ligeramente en comparación con el diseño

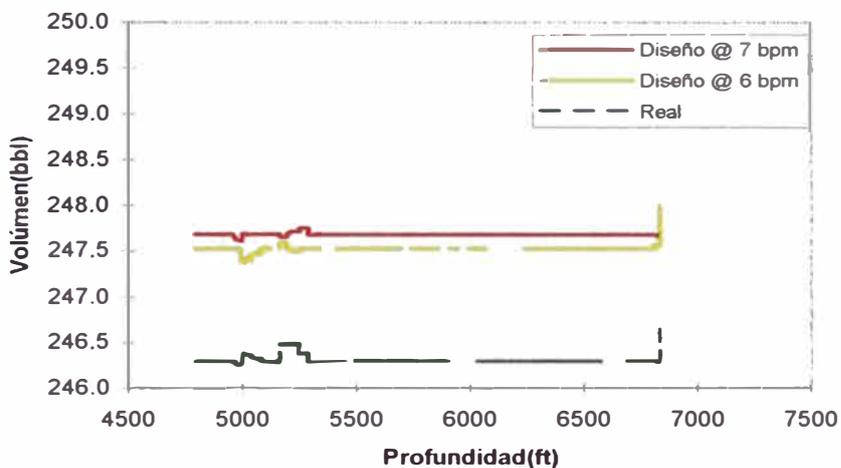
Evaluación del Tiempo de Contacto y/o Volumen Efectivo

Ingresando los caudales de bombeo reales al simulador se puede obtener el Tiempo de Contacto y el Volumen Efectivo real. Para este caso específico, el Tiempo de Contacto real está por encima de 6 min y casi todo el volumen de las mezclas pasa en Flujo Laminar Efectivo. Los criterios de Remoción del Lodo se cumplen y se esperan buenos resultados en el Registro CBL/VDL.

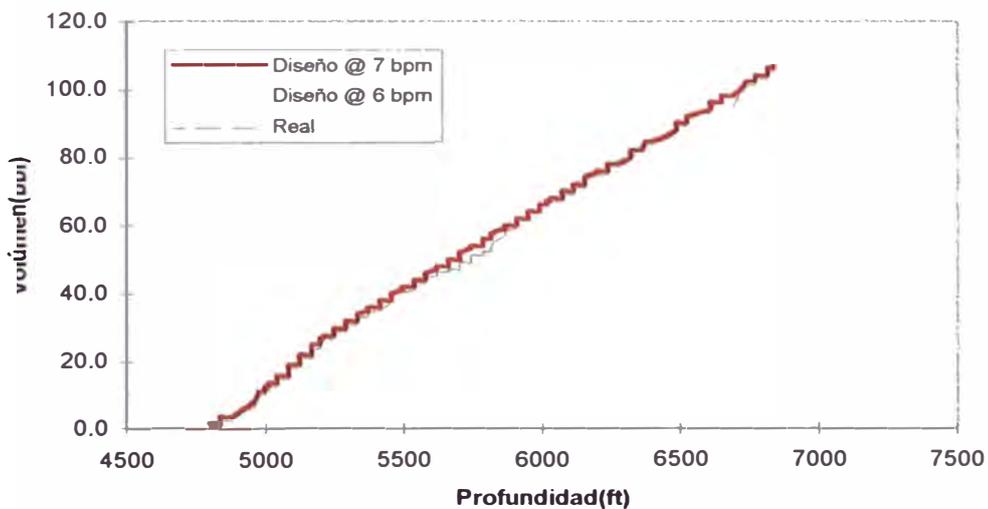
TIEMPO DE CONTACTO



VOLUMEN EFECTIVO(M. Relleno)



VOLUMEN EFECTIVO(M. Principal)



5.2 EVALUACION DE LA CALIDAD DE LA CEMENTACION - REGISTRO CBL/VDL

El registro CBL/VDL muestra buena adherencia Tubería - Cemento - Formación en toda la zona de interés (6858 ft -4770 ft)

- En el CBL, las Amplitudes son bajas (menores que 5 mV)
- Entre 5000-5200 ft se tienen valores de Amplitud más elevados que podrían reflejar la contaminación entre las mezclas, sin embargo se tienen buenos sellos tanto en la parte inferior como en la parte superior.
- El VDL muestra fuertes señales de la formación

Encima de 4700 ft, el registro CBL/VDL muestra altos valores de Amplitud y tubería libre. Esto Refleja claramente que en la zona no centralizada no existe una buena adherencia Tubería Cemento - Formación.

5.3 ANALISIS DE COSTOS

La Figura 48 muestra 10 pozos representativos de los resultados de la campaña de perforación de 1998 en el Noroeste. Sólo en un 20% de los pozos (2) se tiene un buena adherencia (CBL) con el método convencional.

Usando la metodología propuesta, se analizó en profundidad las causas que generaron estos malos registros de adherencia (CBL) en casi el 60 % de los pozos.

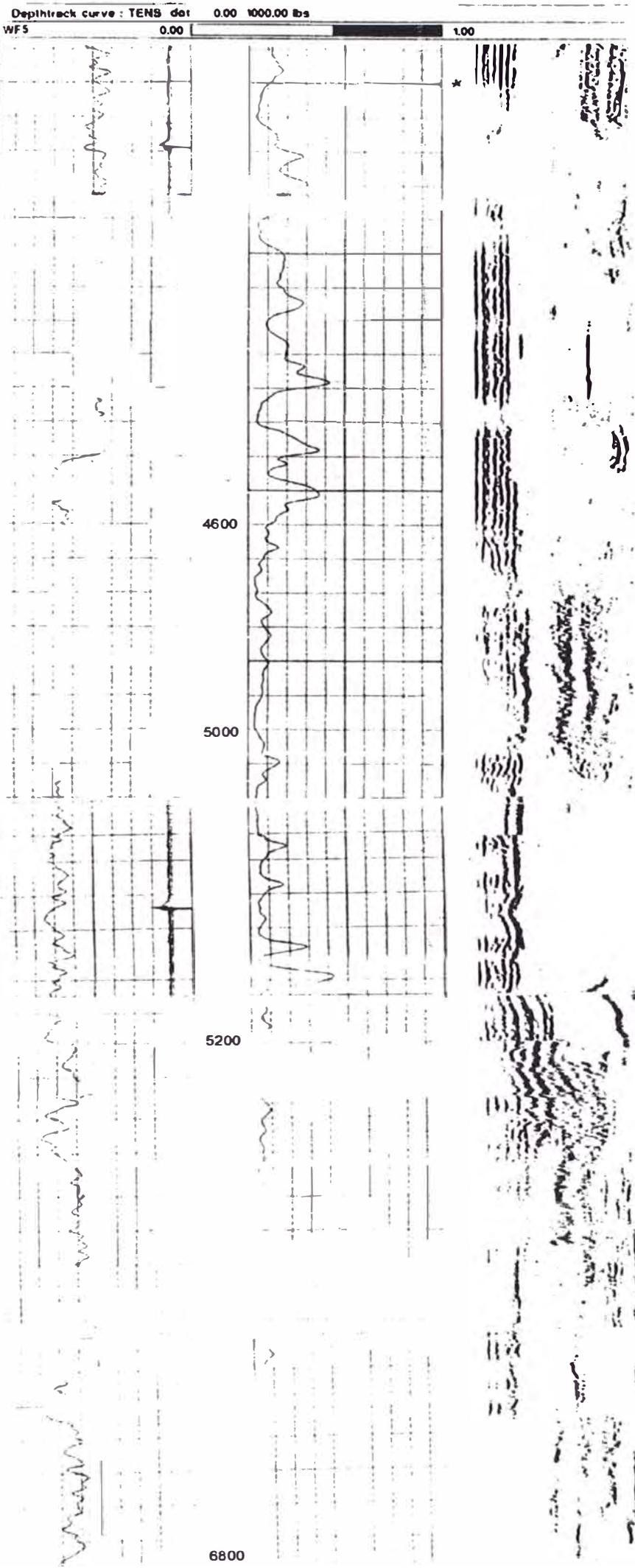
- En la parte de Diseño, se encontró que no existió suficiente Tiempo de Contacto y/o suficiente volúmen de Lavadores. La reología de los espacedores y las mezclas de cemento no cumplían con el criterio de diferencial de densidad y jerarquía de presión por fricción. Además debido al bajo STO y/o selección incorrecta de centralizadores, no se pudo alcanzar Flujo Turbulento y/o Flujo Laminar Efectivo (FLE) en todo el anular excéntrico.
- En la Ejecución solo en la mitad de los pozos (3), se encontró muchas variaciones de caudal y densidad que podrían haber afectado el régimen de flujo seleccionado y las propiedades del cemento fraguado

De lo anteriormente expuesto, podemos inferir que, siguiendo la metodología convencional, el porcentaje de éxito en una cementación primaria es muy reducido (20%) y únicamente los costos de una sola etapa de resane de cemento bordean el 169 % del costo de una cementación

convencional (A), sin considerar la producción diferida y/o el daño irreparable a la formación productiva que son parámetros difíciles de cuantificar. Todo esto demuestra que es muy importante la realización de una buena cementación incluso a un precio inicial un poco mayor (34%) con la metodología propuesta, para evitar un gasto posterior más grande que no asegura el aislamiento hidráulico de las formaciones.

La metodología propuesta se ha estado usando en los últimos 4 años tanto en el noroeste como en la selva (Camisea) con muy buenos resultados, tales como los mostrados en el caso presentado (sección 4). La dificultad en la obtención de este tipo de información confidencial no permite mostrar un mayor número de casos.

25 1.00 CCLR -25000.00 0.00 AMP 50.00
 1000 MV 80.00 Ft 80.00 mV
 GR 1:240 280.00 200.00 WFS 1200.00
 API uS



METODOLOGIA CONVENCIONAL ANALIZADA A TRAVES DE METODOLOGIA PROPUESTA

Pozo	DISEÑO				EJECUCION			EVALUACION	Comentarios
	Prof.(ft)	Lav.	Espac.	Mezclas de cemento	STO	Bombeo	Remoción- Lodo	CBL(adherencia)	
1	1475	B	Baja Densidad	Baja Reología	>70%	Caudal Irreg.	Deficiente	R	No se registro densidad
2	4014	B	B	Baja Reología	>70 %	Caudal Irreg.	T. Contacto > 6 min, Si FLE	B	(* No FLE de las mezclas
3	1700	B	Alta Reología	Baja Reología	>70%	Densidad Irreg.	Deficiente	R	
4	4592	R	Alta Reología	Baja Reología	R	Densidad Irreg.	Deficiente	Malo	
5	1922	R	Baja Densidad	Baja Reología	R	Densidad Irreg.	Deficiente	Malo	No hubo retomo, pérdidas
6	5417	R	Baja Densidad	B	Bajo	B	Deficiente	Malo	
7	4804	R	B	Diseño Incorrecto	R	B	T. Contacto < 6 min, Si FLE	B	(* No FLE de las mezclas
8	1960	R	Alta Reología	Diseño Incorrecto	Bajo	Densidad Irreg.	Deficiente	Malo	No hubo retomo, pérdidas
9	1954	R	R	Diseño Incorrecto	Bajo	R	Deficiente	Malo	
10	1838	R	Baja Reología	B	Bajo	B	Deficiente	Malo	

(1)

(2)

(3)

(4)

(5)

(6)

(7)

R = Regular, B = Bueno

- (1) R = No se tiene suficiente tiempo de contacto o suficiente volúmen de Lavador
- (2) Chequeo del diferencial de densidad y la jerarquía de presión por fricción en el espaciador
- (3) Chequeo del diferencial de densidad y la jerarquía de presión por fricción en las mezclas
- (4) Chequeo de la centralización de la tubería(STO), R = 50% de STO, Bajo = STO < 50%
- (5) Caudal irreg. = Variación del caudal de bombeo, Densidad irreg.= Variación de la densidad en los fluidos bombeados
- (6) Deficiente = Bajo Tiempo de contacto ó no se alcanzo el Flujo Turbulento y/o Flujo Laminar Efectivo(ELF) en todo el anular
- (7) Malo = alta amplitud, R= Regular amplitud, B = Baja amplitud

Figura 48

ANALISIS DE COSTOS

A. METODOLOGIA CONVENCIONAL

<i>COSTOS DE CEMENTACION</i>	US \$
SERVICIOS	8000
PRODUCTOS (ADITIVOS, CEMENTO, BENTONITA)	13150
MATERIAL DE FLOTACION Y CENTRALIZADORES	3000
COSTO TOTAL(US \$)	24150

<i>COSTOS ADICIONALES - UNA ETAPA DE RESANE DE CEMENTO</i>	US \$
<i>BALEO(8 Tiros/ft)</i>	5480
<i>RESANE DE CEMENTO</i>	
SERVICIOS	3200
PRODUCTOS (ADITIVOS, CEMENTO)	660
HERRAMIENTAS (PRK + RBP)	500
COSTO DEL EQUIPO DE PERFORACION (2 DIAS)	24000
REGISTRO CBL/VDL	7200
COSTO TOTAL(US \$)	41040

B. METODOLOGIA PROPUESTA

<i>COSTOS DE CEMENTACION</i>	US \$
SERVICIOS	9540
PRODUCTOS (ADITIVOS, CEMENTO, BENTONITA)	16900
MATERIAL DE FLOTACION Y CENTRALIZADORES	6000
COSTO TOTAL(US \$)	32440

CONCLUSIONES

1. Dos regímenes de flujo desplazan eficientemente el lodo en un anular excéntrico: el Flujo Turbulento (primera opción) y el Flujo Laminar Efectivo (**FLE**). En el desplazamiento en Flujo Turbulento, se debe buscar turbulencia en todo el anular. Mientras que en el desplazamiento de un fluido Bingham en Flujo Laminar Efectivo (**FLE**) se debe exceder su punto de cedencia en todo el anular excéntrico (Q_{\min}) y mantener una interface estable y uniforme evitando la formación de canales (Q_{\max}).
2. Para obtener una buena remoción de lodo es importante:
 - Mover la tubería (rotar y/o reciprocarse)
 - Tener una buena compatibilidad entre los fluidos a ser bombeado para evitar la formación de mezclas más difíciles de remover
 - Usar tapones de fondo en las interfaces de mayor diferencial de densidad
 - Optimizar la centralización, tanto en Flujo Turbulento como en Flujo Laminar Efectivo (mínimo $STO = 70\%$), teniendo en cuenta que la centralización es un parámetro más crítico cuando se diseña en Flujo Turbulento.
 - Cumplir los cuatro criterios del **FLE** (Diferencial de densidad, Jerarquía de presión por fricción, Mínimo Gradiente de Presión, y Diferencial de Velocidades), sólo así se obtendrá un rango amplio de caudales mínimo (Q_{\min}) y máximo (Q_{\max}). El **FLE** debe ser empleado en todas las interfaces de los fluidos, especialmente si se tienen “mezclas especiales”.
 - Optimizar la reología y los caudales de bombeo de acuerdo al régimen de flujo seleccionado.
3. La geometría del pozo determina una de las condiciones para una cementación exitosa. En zonas donde existen grandes irregularidades, es conveniente usar un tren de fluidos. Lavadores para tener Flujo Turbulento en las zonas estrechas y Espaciadores para asegurar por lo menos Flujo Laminar Efectivo en las zonas de gran diámetro. El cambio de flotabilidad a medida que los fluidos pasan por el fondo del pozo, reciprocarse la tubería, lo cual modificará el **STO** y ayudará a la remoción del lodo.
4. Las características del Centralizador (**Max OD, RF**) influyen mucho en la determinación de la centralización. Si el centralizador es más grande que el diámetro del pozo, solo un incremento de la Fuerza de Restauración (**RF**) es significativa. Mientras que, si el centralizador es más pequeño que el diámetro del pozo, se necesita un incremento de la

Fuerza de Restauración y del diámetro máximo del fleje (**Max OD**) para incrementar el **STO**. La Fuerza de Corrido del centralizador debe ser baja para evitar problemas en la bajada de la tubería de revestimiento.

5. Los valores reológicos del lodo durante el acondicionamiento previo a la cementación deben ser reducidos para hacer posible su movimiento en todo el anular excéntrico(Q_{min}).
6. En el diseño de las mezclas de cemento se debe tener en cuenta las interacciones cemento-Formación (sección 2.2.2) y las consideraciones especiales para pozos altamente desviados u horizontales (2.4).
7. En el diseño, para Flujo Turbulento, el caudal crítico (Q_{crit}) será el mínimo caudal anular que asegura Flujo Turbulento en toda la zona de interés. Mientras que en Flujo Laminar Efectivo, el **caudal mínimo (Q_{min})** será el máximo de los caudales mínimos y el **caudal máximo (Q_{max})** será el mínimo de los caudales máximos a través de toda la zona de interés.
8. La simulación de los caudales de diseño (Q_{in}) permitirá saber realmente que caudal pasa por el pozo (Q_{out}) y si es posible modificarlo para estar dentro del rango aceptable de **FLE**, o dentro del tiempo de contacto mínimo requerido.
9. El registro de los parámetros en tiempo real, permite la toma de decisiones inmediatas. Además , la evaluación del Tiempo de Contacto real y el **Volúmen Efectivo** real proporciona una base para una evaluación final exitosa (CBL/VDL)
10. Como se ha mostrado en el análisis de costos, reparar una mala cementación es mucho más caro (169% del costo de una cementación convencional) que hacerlo adecuadamente la primera vez, aunque esto involucre un costo inicial un poco mayor (34%) debido a la cantidad de centralizadores y/o aditivos, tiempo de acondicionamiento del lodo, etc. La metodología convencional tiene un factor de éxito muy bajo, en cambio la metodología presentada se ha estado usando en los últimos 4 años tanto en el Noroeste como en selva(Camisea) con bastante éxito. No ha sido posible mostrar más resultados, debido a la confidencialidad de los mismos.

RECOMENDACIONES

1. Los valores reológicos del lodo deben ser iguales, a la entrada y salida del pozo antes de iniciar la circulación mínima de dos volúmenes de hueco. Sólo esto asegura el movimiento del lodo al caudal mínimo (Q_{min}).
2. En el caso de pozos altamente desviados u Horizontales, es muy importante el uso de un simulador de temperatura para calcular la Máxima Temperatura de Circulación del pozo (**MHCT**) y el mínimo tiempo de circulación del lodo para el enfriamiento del pozo. La prueba de Bombeabilidad en base a estos resultados es la más recomendada.
3. El registro Caliper debe ser ingresado con la mayor precisión posible ya que de esta variación dependerán la centralización obtenida (**STO**) y la selección del régimen de flujo.
4. La selección de centralizadores debe estar basada en los diámetros promedio encontrados en la zona y el tipo de pozo (vertical o altamente desviado).
5. Usar el módulo LPS (Laminar Placement Simulator) que permite determinar el perfil de velocidades de todo el anular. Este mapa de velocidades permitirá evaluar el riesgo de dejar lodo en el anular excéntrico a los caudales diseñados.

BIBLIOGRAFIA

- 1. Well Cementing**
Erik B. Nelson
- 2. Cementing Technology**
Schlumberger Dowell
- 3. CemCade User Manual**
Schlumberger Dowell
- 4. Modernizing Well Cementing and Evaluation(Oilfield Review paper)**
D. Guillot, J. Jutten, B. Piot , T. Simien and I. Toma
Dowell Schlumberger
- 5. Seamless Fluids Programs: A key to Better Well Construction(Oilfield Review paper)**
Lindsay Fraser, Bill Stanger Houston, Texas, Usa
- 6. Mud Removal: Research Improves Traditional Cementing Guidelines(Oilfield Review paper)**
Simon Bittleston
Cambridge, England
- 7. Getting to the Root of Gas Migration(Oilfield Review paper)**
Art Bonett
Cambridge, England
- 8. Design Cementing curse(1996)**
- 9. Advanced Cementing curse(1997)**
- 10. Horizontal Well**
Completion & Stimulation Technology
Schlumberger Dowell
- 11. Sistema de Bombeo**
Manual de Entrenamiento - Dowell Schlumberger
- 12. Mud Removal Sales Book**
Schlumberger Dowell
- 13. Cementing Engineering Manual**
Schlumberger Dowell
- 14. Cement Quality**
Schlumberger Dowell
- 15. Cementing Materials Manual**
Schlumberger Dowell

PRUEBAS DE LABORATORIO - POZOS ALTAMENTE DESVIADOS - NOROESTE

TIPO DE TRABAJO :	Cementación de Tubería de producción 5 1/2"	PROFUNDIDAD(VERTICAL):	3400 ft
TIPO DE CEMENTO:	Clase A	PROFUNDIDAD(MEDIDA):	6858 ft
MEZCLA:	Relleno	BHST:	110 °F
		BHCT:	92 °F

Mezcla Nro.	Densidad ppg	Rend. Ft3/sx	Agua de Mezcla		ADITIVOS (% BWOC ó Gal/Sk.)						A. Libre cc/250 cc	P. Filtrado cc/30 min	T. Bombeabilidad(H:min)	
			%	Gal/Sk	D020 Extendedor	D112 P.Filtrado	D065 Dispersante	D153 Anti-Sediment	D013 Retardador	D047 Antiespumante			70 BC	100 BC
1	14.1	1.56	67.50	7.63	6%	0.45%	0.25%			0.006	0.5	121		
2	14.1	1.54	67.27	7.60	4%	0.40%	0.30%			0.006	4.5	259		
3	14.1	1.54	67.27	7.60	4%	0.40%	0.30%	0.1%		0.006	3.0	221	3:50	4:10

Mezcla Nro.	RHEOLOGIA @ BHCT				PARAMETROS REOLOGICOS				RESIST.COMPRESION(PSI)		
	300	200	100		PV	Ty	n'	k'	8 Hr	24 Hr	48 Hr
1	161.0	129.5	99.5		92.3	68.8					
2	60.0	49.0	34.0		39.0	21.0					
3	81.0	62.0	45.0		54.0	27.0				980	1040

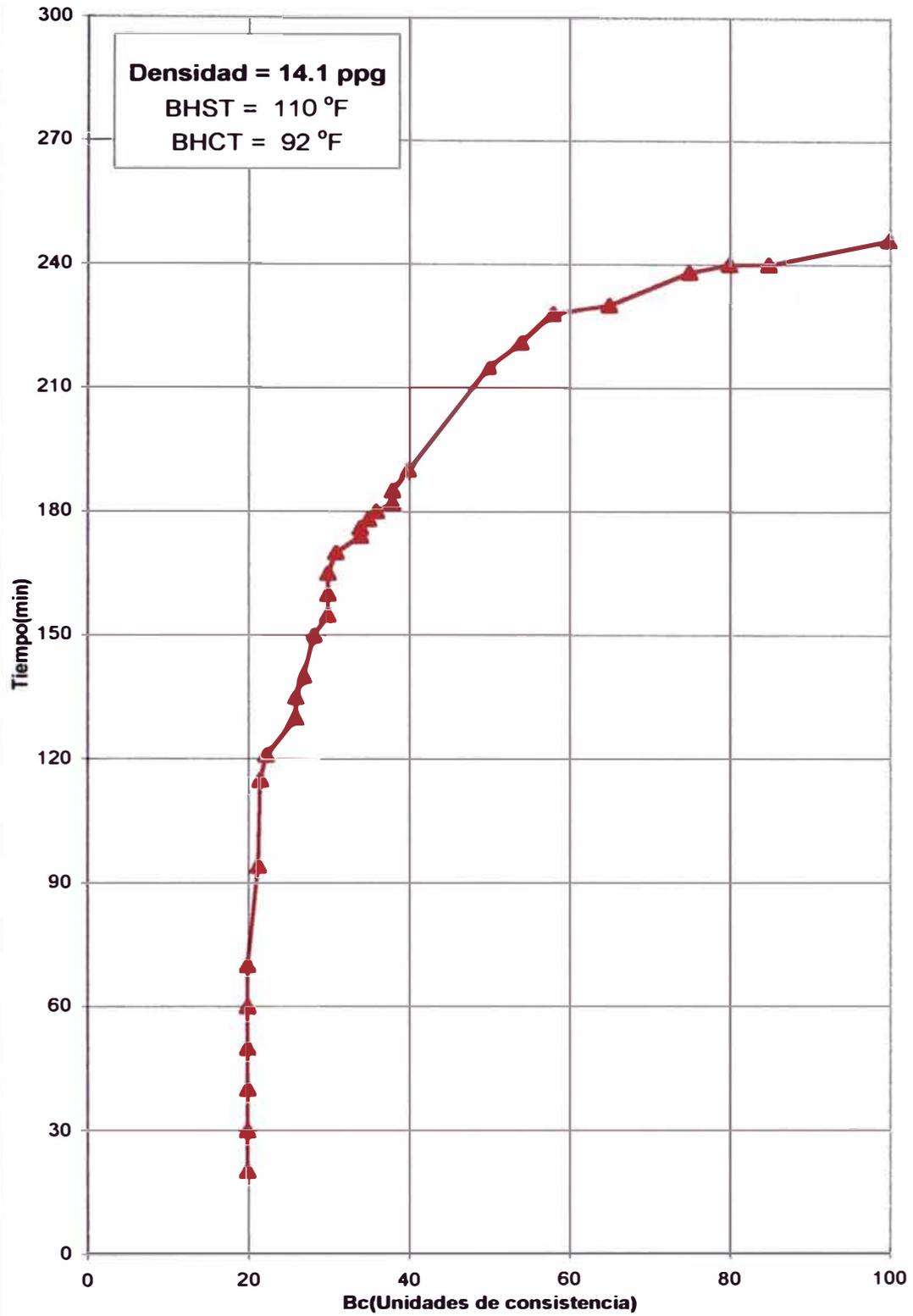
OBSERVACIONES:

La BHST y la BHCT han sido tomadas con respecto a la profundidad vertical

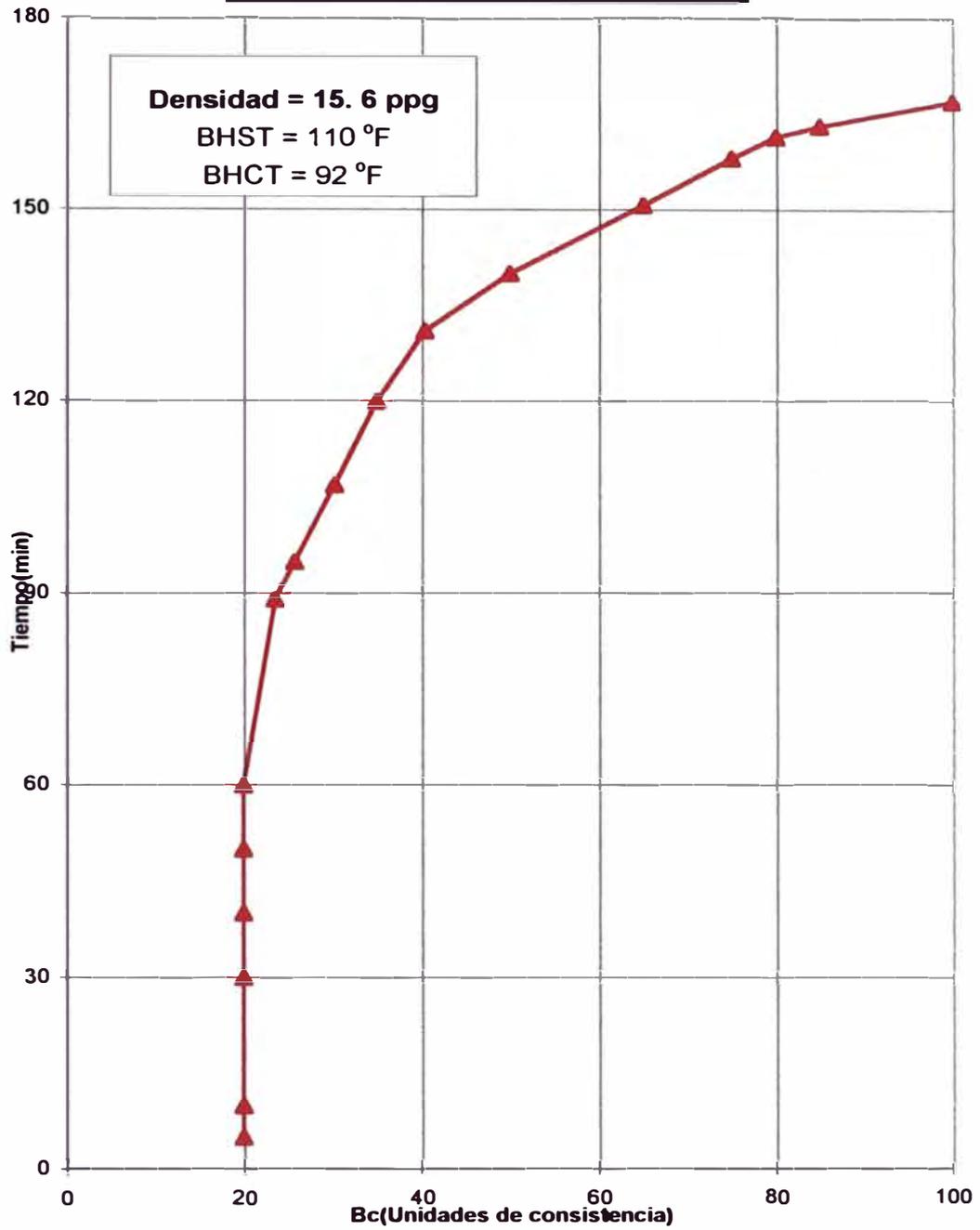
El agua libre se midió con un ángulo de 45 grados, con "0" grados de inclinación el agua libre es cero

D020 reduce el agua libre, D153 reduce la sedimentación y el agua libre (viscosifica el agua)

Tiempo de Bombeabilidad



Tiempo de Bombeabilidad

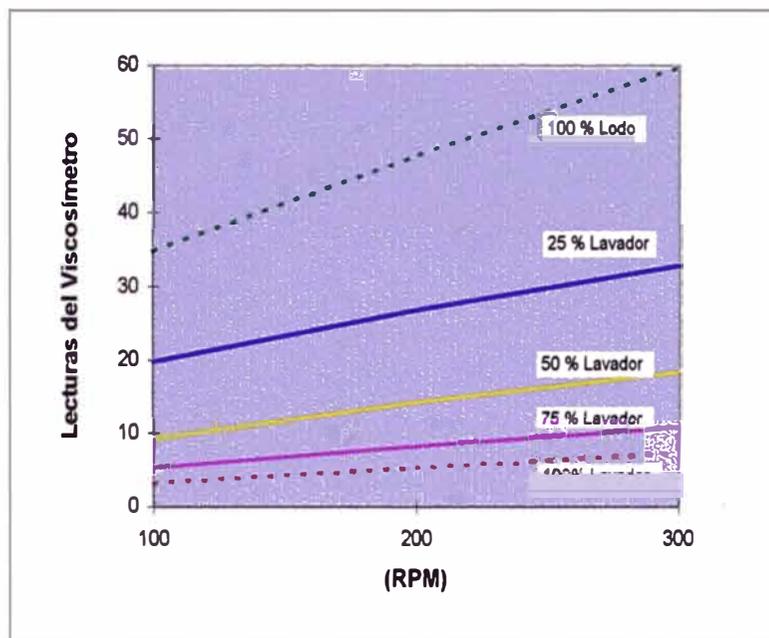


PRUEBA DE COMPATIBILIDAD

Lavador Químico 8.32 ppg
 Temperatura 80 °F

Lodo base agua 10.5 ppg

Porcentajes en volúmen		Lecturas del viscosímetro					PV	TY
%Lavador	%Lodo	300	200	100	Gel 10 seg	con 1min rot.		
100%	0%	7.5	5.5	3.5	1.0	1.0	6.0	1.5
75%	25%	11.0	8.5	5.5	2.0	1.5	8.3	2.8
50%	50%	18.5	14.5	9.5	3.0	2.0	13.5	5.0
25%	75%	33.0	27.0	20.0	8.5	5.0	19.5	13.5
0%	100%	60.0	48.0	35.0	22.0	12.0	37.5	22.5



OBSERVACIONES:

(*) Las mezclas son compatibles a 100 RPM(simula las condiciones del pozo)