"Diseño de Revestimiento y Cementación de Pozos en el Oriente Ecuatoriano"

William Morán Palacios [1]
Lissette Lituma Mandujano [2]
Ing. Xavier Vargas [3]
Ing. Daniel Tapia [4]

[1]Ingeniero de Petróleos 2009, e-mail: andresmoran18@hotmail.com
[2] Ingeniero de Petróleos 2009, e-mail: liss_lituma@hotmail.com
[3]Profesor de Materia de Graduación, Ingeniero de Petróleo,
[4]Profesor de Materia de Graduación, Ingeniero de Petróleo,

Resumen

La selección apropiada de las tuberías de revestimiento es un factor importante en la programación, planificación y operaciones de un pozo petrolero, y de igual forma la cementación tiene una gran importancia en la vida del pozo, ya que los trabajos de una buena completación dependen directamente de una buena cementación.

El presente trabajo se enfoca en demostrar una alternativa al diseño actual del Revestimiento del pozo ESPOL X6-D aplicando el método de Diseño por Ensayo y Error, junto con su respectivo programa de cementación. Se resalta la historia del pozo, describiendo la ubicación del campo donde fue perforado, características litológicas y enfoques básicos sobre el programa de perforación aplicado. Se describen además conceptos elementales sobre revestimiento y cementación de pozos junto con los métodos utilizados, para luego proceder a realizar el rediseño del revestimiento y el volumen de lechada a utilizarse en la cementación de éstos.

Finalmente se compara de forma cuantitativa el diseño propuesto con el diseño actual y se define si se pudo o no lograr la optimización del mismo.

Palabras Claves: Diseño Revestimiento, Programa Cementación

Abstract

The proper selection of the casing is an important factor in the planning, organization and operations of an oil well, and cementation also plays an important role in the life of the well, since the work of a good completion depends directly in a good cementing.

The present paper focuses on demonstrating an alternative to the current design of the well ESPOL X6-D using the method of Design by Trial and Error, along with their cementing program. It highlights the history of the well, describing the location where the field was drilled, lithological features and basic approaches about the drilling program implemented. It also describes basic concepts of casing and cementing of wells along with the methods used, and then proceeds with the redesign of the casing and the volume of slurry used to cement them.

Finally a quantitative comparison of the proposed design with the current design is made to define whether or not it was possible to achieve the optimization of it.

Introducción

Durante la construcción de un pozo de petróleo los procesos de revestimiento y cementación son de vital importancia para el mismo, dado que una deficiente selección y fallas en los cálculos traerían drásticas consecuencias; tales como incremento de los costos, riesgo de pérdida del pozo, riesgos hacia el ambiente y a la seguridad. Por tal motivo al momento de diseñar el revestimiento y cementar un pozo petrolero se deben tomar en cuenta las nuevas técnicas, así como las mejores prácticas operacionales dirigidas hacia ambos procesos.

El diseño óptimo de un revestidor se asegura en la selección adecuada y económica de tuberías revestidoras, así como su duración y capacidad de resistencia a las condiciones a encontrar durante la perforación y vida útil del pozo.

Mientras que el programa de cementación debe diseñarse para obtener una buena cementación primaria. El trabajo debe aislar y prevenir la comunicación entre las formaciones cementadas y entre el hoyo abierto y las formaciones superficiales detrás del revestidor. Debe considerarse el no fracturar alrededor de la zapata del conductor o de la sarta de superficie durante las subsiguientes operaciones de perforación o cuando se corren las otras sartas de revestimiento.

Parámetros que intervienen en el diseño de revestimiento.

Las funciones elementales de una tubería de revestimiento son:

a) Soporta las paredes del pozo y detiene las tendencias de derrumbes de las formaciones no consolidadas.

b) Evitar contaminación de agua superficial.

c) Evita el escape de los fluidos de la formación a través del pozo de un estrato a otro.

d) Sirve de punto de apoyo del equipo de trabajo.

El número de sartas de revestimiento que pueden introducirse en un pozo depende de las presiones que se esperan en el subsuelo. Generalmente se usan de dos a tres tipos de revestimiento más un tubo protector en la parte más superficial. Estas tuberías se les conoce como:

a) Tubo Conductor o Protector
b) Revestimiento Superficial
c) Revestimiento Intermedio
d) Revestimiento de Producción

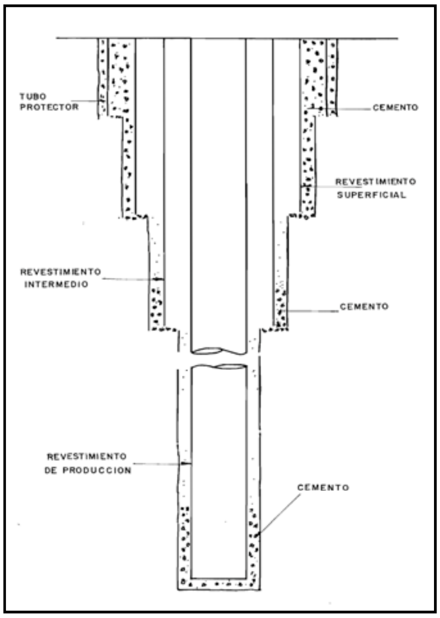

Figura 1. Detalle de Revestimientos Colocados en un Pozo Petrolero (Fuente: Metodología para Analizar y Resolver Problemas de Perforación)

Para diseñar la tubería de revestimiento deben conocerse los esfuerzos a la cual estará sometida y las diferentes características del tipo de tubería a usarse.

Al introducir una tubería en el hueco, estará sometida simultáneamente a tres esfuerzos principales, los cuales son:

a) **Esfuerzo a la Tensión,** originado por el peso que ejerce la sarta.

b) **Esfuerzo al Colapso,** originado por la presión de la columna hidrostática ejercida hacia la tubería.

c) **Esfuerzo al Estallido,** originada por la presión del fluido en el interior de la tubería.

Habrá que tomar en cuenta además los factores de diseño, conocidos como factores de seguridad, y que varían según el área y el criterio del diseñador. Lo que se debe tener siempre en mente es que por lo menos el diseño sea seguro. El rango de valores usados en la industria como factores de diseño es:

- Para tensión de 1.6 a 2.0
- Para colapso de 1.1 a 1.33
- Para estallido de 1.0 a 1.25

Usar un factor para la tensión de 2.0 previene al diseñador de cualquier esfuerzo de tensión que se presenta en el momento de introducir la Tubería de Revestimiento.

Efecto de Flotación

Cuando se diseña por tensión, basado en el peso de la tubería en el aire, se desprecia el efecto de la flotación que ayuda con el peso de la tubería. La flotación reduce el peso de la tubería en un 15 al 17%, por consiguiente cualquier factor de diseño no es real, sin embargo, es más seguro. El factor de flotación esta dado por:

F.F. = 1 - 0.015 x densidad del fluido

Parámetros que intervienen en el diseño de revestimiento.

Entre los propósitos principales de la cementación se pueden mencionar los siguientes:

- Proteger y asegurar la tubería de revestimiento en el hoyo.
- Aislar zonas de diferentes fluidos.
- Aislar zonas de agua superficial y evitar la contaminación de las mismas por el fluido de perforación o por los fluidos del pozo.
- Evitar o resolver problemas de pérdida de circulación y pega de tuberías.
- Reparar pozos por problemas de canalización de fluidos.
- Reparar fugas en el revestidor.

La cementación tiene una gran importancia en la vida del pozo, ya que los trabajos de una buena completación dependen directamente de una buena cementación.

A continuación se describen las clases de cementos comúnmente usados en las cementaciones en el país.

Clase A: Apropiado para ser usado desde superficie hasta 6000’ de profundidad, cuando no se requieren propiedades especiales. Disponible solo en el tipo ordinario de resistencia a los sulfatos.

Clase *G:* Apropiado para ser usado como un cemento básico desde superficie hasta 8000’ de profundidad como está elaborado, o puede ser usado con aceleradores y retardadores para cubrir un amplio rango de profundidades y temperaturas de pozos.

Clase H: Apropiado para ser usado como un cemento básico desde superficie hasta 8000’ de profundidad, tal como está elaborado, o puede ser usado con aceleradores y retardadores para cubrir un amplio rango de profundidades y temperaturas de pozos.

Información general del pozo

Coordenadas de Superficie (UTM):
Norte: 9'948,774.962 m
Este: 301,967.340 m
Objetivos:
∗ Arena U Inferior Principal
- TVD: 9540.817 ft.TVD
- Norte: 9'949,830.00 m
- Este: 301,960.250 m
- Tolerancia del Objetivo: 50 pies de radio

Objetivos secundarios:
∗ Arena T Inferior
- TVD: 9819.817'TVD
- Norte: 9'949,850.664 m
- Este: 301,959.358 m
- Tolerancia del Objetivo: 50 pies de radio

∗ Arena Hollín Inferior
- TVD: 10054.817'TVD
- Norte: 9'949,864.622 m
- Este: 301,958.756 m
- Tolerancia del Objetivo: 50 pies de radio

Programa de perforación

El pozo ESPOL X6-D es un pozo direccional tipo "J" modificado, con un desplazamiento de 3,461.486 pies al objetivo principal Arena U Inferior, 3,529.303 pies y 3,575.112 pies a los objetivos secundarios Arena T Inferior y Hollín Inferior respectivamente.

El pozo fue perforado en tres secciones:

- **Sección de 16":** En esta sección se utilizó el BHA direccional # 1, donde se realizó el Nudge @ 350', se construyó curva a razón de 1.75°/100' hasta alcanzar 6° de inclinación en una dirección de 75°, se continuó construyendo curva hasta alcanzar los 12° de inclinación en una dirección de 30°, para luego terminar de construir curva a razón de 1.5°/100' hasta alcanzar los 23.3° inclinación en una dirección de 357.529° y mantener tangente de 7323.508' hasta asentar el revestimiento de 13 3/8", @ 6036.448' MD/5669.506' TVD.

- **Sección de 12 ¼":** Se inició esta sección con el BHA direccional #2, se continuó manteniendo tangente, fue necesario se usar el BHA direccional # 3 para perforar el Conglomerado de Tiyuyacu, luego se utilizó el BHA # 4 para perforar Tena hasta el asentar el revestimiento de 9 5/8" @ 9315.318'MD/8680.972' TVD.

- **Sección de 8 ½":** Utilizamos el BHA direccional # 5, para perforar hasta el tope de Napo manteniendo tangente, a partir del cual se siguió la tendencia natural a tumbar de las formaciones hasta interceptar los objetivos arena U Inferior Principal, T Inferior y Hollín Inferior.

Diseño de revestimiento del pozo ESPOL X6-D

El diseño del revestimiento para este pozo se aplica en base a los criterios del Método de Ensayo y Error para las tres secciones que lo constituyen, es decir, la superficial, la intermedia y la de producción. Como parámetro principal, las tuberías seleccionadas deben cumplir con los tres esfuerzos antes mencionados para poder ser parte del revestimiento de cada sección. Como limitación para nuestro diseño solo se puede usar un tipo de tubería para cada sección; conociendo esto y habiendo aplicado las fórmulas requeridas por el método de Ensayo y Error, cada sección queda revestida de la siguiente manera:

- **Revestimiento superficial:** La profundidad de asentamiento de este revestimiento fue a 5990'. Luego de comprobar su resistencia a los esfuerzos de colapso, tensión y estallido se seleccionó la tubería C-95, 72 lb/ft, de las siguientes características:

Tabla 1. Características Casing 13 3/8" C-95, 72 lb/ft

OD (pulg.)	ID (pulg.)	Rc (psi)	Re (psi)	Rt (x1000lb.)
13.375	12.347	2820	6390	1893

- **Revestimiento intermedio:** Este revestimiento fue asentado a 8675'. Luego de comprobar su resistencia a los esfuerzos de colapso, tensión y estallido se seleccionó la tubería N-80, 53.5 lb/ft, de las siguientes características:

Tabla 2. Características Casing 9 5/8" N-80, 53.5 lb/ft

OD (pulg.)	ID (pulg.)	Rc (psi)	Re (psi)	Rt (x1000lb.)
9.625	8.535	6620	7930	1329

- **Revestimiento de producción (liner):** Este revestimiento fue asentado hasta la profundidad total del pozo (10875') como es debido y su colgador a 8475' de profundidad. Luego de comprobar su resistencia a los esfuerzos de colapso, tensión y estallido se seleccionó la tubería N-80, 29 lb/ft, de las siguientes características:

Tabla 3. Características Casing 7" N-80, 29 lb/ft

OD (pulg.)	ID (pulg.)	Rc (psi)	Re (psi)	Rt (x1000lb.)
7	6.184	7020	8160	746

Programas de Revestimiento

Tabla 4. Programa de revestimiento actual

	Intervalo (ft)	Grado	Peso (lb/ft)	Número de tubos	Longitud (ft)
Superficial	0 – 5990	C-95	72	150	5990
Intermedio	0 – 9315	C-95	47	233	9315
Liner	9014 – 10875	C-95	26	47	1861

Tabla 5. Programa de revestimiento alterno

	Intervalo (ft)	Grado	Peso (lb/ft)	Número de tubos	Longitud (ft)
Superficial	0 – 5990	C-95	72	150	5990
Intermedio	0 – 8675	N-80	53.5	217	8675
Liner	8475 – 10875	N-80	29	60	2400

Comparación económica de los diseños de revestimiento alterno y actual

A continuación se presenta una tabla comparativa de ambos diseños resaltando los costos de cada uno para verificar si se pudo o no lograr la optimización.

Tabla 6. Comparación económica de diseños

Casing	Precio (USD/ft)	Longitud actual (ft)	Longitud alterna (ft)	Costo Diseño actual (USD)	Costo Diseño alterno (USD)
13 3/8"	78.32	5 990	5 990	469 136.8	469 136.8
9 5/8"	42.11	9 315	8 675	392 254.7	365 304.3
7"	32.53	1 860	2 400	60 505.8	78 072
			TOTAL(USD)	**921 897.3**	**912 513.1**

Diseño del programa de cementación del pozo ESPOL X6-D

La cementación del pozo de cada una de las secciones del pozo se la realiza a través de una cementación primaria la cual consiste en mezclar cemento seco y ciertos aditivos con agua, para formar una lechada que es bombeada al pozo a través de la sarta de revestimiento y colocarlo en el espacio anular entre el hoyo y el diámetro externo del revestidor. El objetivo en cada sección es determinar la cantidad de sacos de cemento y volúmenes a utilizar tanto en la lechada de relleno como en la lechada de cola, y el volumen de desplazamiento requerido para desplazar toda la mezcla hacia el espacio anular donde se alojará la misma. Por las características de los tipos de cemento antes descritas, se usa el cemento clase "A" para las secciones superficial e intermedia, y el cemento clase "G" para la sección de producción. Entonces, dados los cálculos, el programa de cementación de cada sección será:

- **Programa de cementación de revestimiento superficial:**

1. Probar líneas de superficie con 3000 psi por 10 min.
2. Colocar tapón de fondo (rojo) y tapón de desplazamiento (negro) en cabezal cementación.
3. Bombear 5 bbl agua (si tapón de fondo no baja por sí solo) x línea inferior.
4. Bombear 15 bbl agua por línea inferior a +/- 5 BPM.
5. Mezclar y bombear lechada relleno a +/- 5 BPM por línea inferior (1499 Sx Cto. a 13.5 lb/gal ---- 451.2 bbl)
6. Mezclar y bombear lechada cola a +/- 5 BPM por línea inferior (375 Sx Cto. a 15.6 lb/gal ----- 79 bbl)
7. Soltar tapón de desplazamiento (quitar seguro). Cerrar línea inferior y abrir línea superior.
8. Desplazar con 882 bbl lodo (x línea sup.) a +/- 15 BPM
9. Asentar tapón de desplazamiento con +/- 1500 psi y observar retorno de cemento por zaranda
10. Mientras se desplaza, reciprocar tubería de revestimiento lentamente. Sacar presión y verificar back flow (contraflujo)
11. Finaliza operaciones. Observar bbl retornados por zaranda y bbl reversados en tks. de camión (back flow)
12. Esperar fraguado por 12 horas.

- **Programa de cementación de revestimiento intermedio:**

1. Probar líneas de superficie con 3000 psi por 10 min.
2. Colocar tapón de fondo (rojo) y tapón de desplazamiento (negro) en cabezal cementación.
3. Bombear 5 bbl agua (si tapón de fondo no baja por sí solo) x línea inferior.
4. Bombear 15 bbl agua por línea inferior a +/- 5 BPM.
5. Mezclar y bombear lechada relleno a +/- 5 BPM por línea inferior (1659 Sx Cto. a 13.5 lb/gal ---- 499.3 bbl)
6. Mezclar y bombear lechada cola a +/- 5 BPM por línea inferior (415 Sx Cto. a 15.6 lb/gal ----- 88 bbl)
7. Soltar tapón de desplazamiento (quitar seguro). Cerrar línea inferior y abrir línea superior.
8. Desplazar con 613 bbl lodo (x línea sup.) a +/- 15 BPM
9. Asentar tapón de desplazamiento con +/- 1500 psi y observar retorno de cemento por zaranda
10. Mientras se desplaza, reciprocar tubería de revestimiento lentamente. Sacar presión y verificar back flow (contraflujo)
11. Finaliza operaciones. Observar bbl retornados por zaranda y bbl reversados en tks. de camión (back flow)
12. Esperar fraguado por 12 horas

- **Programa de cementación de revestimiento de producción:**

1. Probar líneas de superficie con 3000 psi por 10 min.
2. Colocar tapón de fondo (rojo) y tapón de desplazamiento (negro) en cabezal cementación.
3. Bombear 5 bbl agua (si tapón de fondo no baja por sí solo) x línea inferior.
4. Bombear 15 bbl agua por línea inferior a +/- 5 BPM.
5. Mezclar y bombear lechada relleno a +/- 5 BPM por línea inferior (282 Sx Cto. a 16 lb/gal ---- 56.75 bbl)
6. Mezclar y bombear lechada cola a +/- 5 BPM por línea inferior (70 Sx Cto. a 16 lb/gal ----- 14.8 bbl)
7. Soltar tapón de desplazamiento (quitar seguro). Cerrar línea inferior y abrir línea superior.
8. Desplazar con 239 bbl lodo (x línea sup.) a +/- 15 BPM
9. Asentar tapón de desplazamiento con +/- 1500 psi y observar retorno de cemento por zaranda
10. Mientras se desplaza, reciprocar tubería de revestimiento lentamente. Sacar presión y verificar back flow (contraflujo)
11. Finaliza operaciones. Observar bbl retornados por zaranda y bbl reversados en tks. de camión (back flow)
12. Esperar fraguado por 12 horas

Comparación económica de los programas de cementación actual y alterno

A continuación se presenta una tabla comparativa de ambos programas resaltando los costos de cada uno para verificar si se pudo o no lograr la optimización.

Tabla 7. Comparación económica de programas de cementación

Casing	Precio ($/Sx)	Cantidad sacos actuales	Cantidad sacos alternativa	Costo Programa actual ($)	Costo Programa alterno ($)
13 3/8”	9.00	1 860	1 874	16 740	16 866
9 5/8”	9.00	920	2 074	8 280	18 666
7”	16.6	360	352	5 976	5 843
			TOTAL (USD)	**30 996**	**41 375**

Gráficas de los diseños de revestimiento y cementación actual y alterno

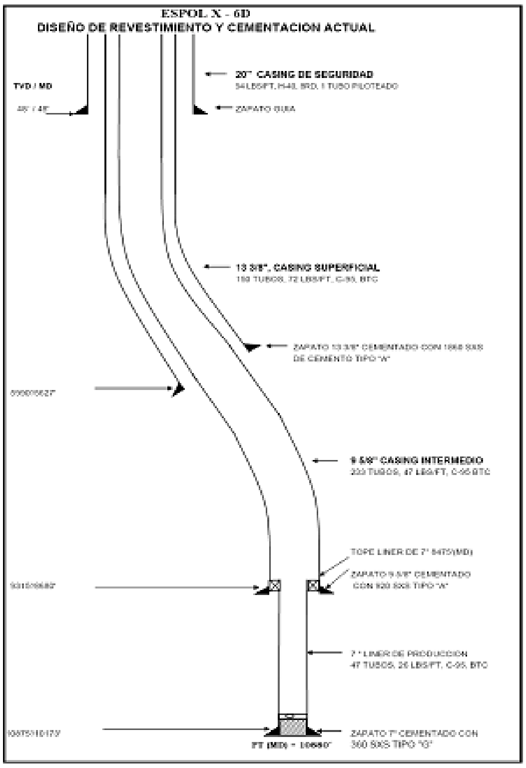

Figura 2. Diseño de Revestimiento y Cementación Actual

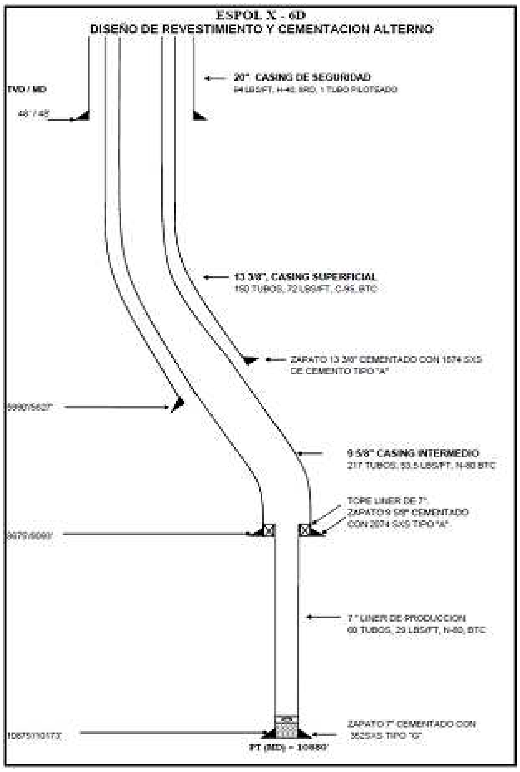

Figura 3. Diseño de Revestimiento y Cementación Alterno

Recomendaciones

1. Para mayor seguridad y resultados más aproximados, se debe utilizar los softwares que poseen las compañías especializadas en diseñar Tubería de Revestimiento y realizar Programas de Cementación.

2. En el caso de no tener limitaciones en el uso de tuberías se debe realizar un diseño de Revestimiento en el que varíe el Grado de Acero o el peso nominal en cada sección, lo que ayudaría a reducir mucho más los costos.

Conclusiones

1. Cierta longitud que ocupaba la sección de revestimiento intermedio pudo ser reemplazada con revestimiento de producción (liner) lo que ayudó en la reducción de costos en el diseño de revestimiento.

2. Se logró una optimización económica con el diseño alternativo de revestimiento, ya que redujo el costo en 9 382.2 USD respecto al diseño actual.

3. A diferencia del diseño actual, se cementó el revestimiento intermedio hasta superficie y no hasta 200 ft. por encima del zapato del revestimiento superficial, esto para evitar problemas de corrosión de la tubería de 9 5/8".

4. Se obtuvo un incremento en el costo del diseño de cementación alternativo de 10 379 USD respecto al actual, esto correspondió en gran parte a la razón antes descrita.

5. Para el pozo direccional de tipo "J" modificado ESPOL X6-D se pudo hacer uso de una longitud de liner mayor a la recomendada pues no existe tanto riesgo de pega como en un pozo horizontal.

6. Por seguridad operacional, para el caso del liner se cementó hasta 200 ft por encima del colgador.

7. Los volúmenes de cementación fueron calculados aumentando 10 ft a la profundidad de asentamiento del zapato de cada revestimiento, pues en la perforación de cada sección siempre se llega a una profundidad mayor a la de asentamiento para que durante la cementación las lechadas pueden circular.

8. La lechada de cola siempre debe ser de mayor densidad que la de relleno, pues es la que va a recubrir la zona donde se asienta el zapato de cada revestimiento.

Referencias

1. Dowell, Well Cementing (Paris: Schlumberger Oil Field, 1988) Capítulo 16

2. D. Barragán, "Planificación, Evaluación Técnica y Análisis de Costos en Operaciones de Cementación Primaria en los Pozos pertenecientes a Petroproducción en el Distrito Amazónico" (Tesis, Facultad de Ingeniería de Petróleo, ESPOL, 1997).

3. S. Gandara, "Diseño de Tubería de Revestimiento" (Tesis, Facultad de Ingeniería de Petróleo, ESPOL, 1990).

4. C. Gatlin, Petroleum Engineering: Drilling and Well Completions, Prentice – Hall Inc., USA, 1965.