



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**APLICACION DE TUBERIAS EXPANDIBLES A LA
PERFORACION DE POZOS EN AGUAS PROFUNDAS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A:
JESUS SANCHEZ MARTINEZ

DIRECTOR DE TESIS: MI. NESTOR MARTINEZ ROMERO



284372

CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO, D. F.

OCTUBRE DE 2000.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



VNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-803

SR. JESUS SANCHEZ MARTINEZ
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M. I. Néstor Martínez Romero y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

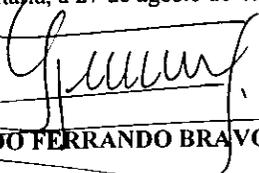
**APLICACIÓN DE TUBERIAS EXPANDIBLES A LA PERFORACION DE POZOS EN
AGUAS PROFUNDAS**

- I INTRODUCCION**
- II ANTECEDENTES**
- III PROPIEDADES DE LAS TUBERIAS DE REVESTIMIENTO EXPANDIBLES**
- IV APLICACION DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO EXPANDIBLES**
- V COSTOS**
- VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- VII BIBLIOGRAFIA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 27 de agosto de 1999
EL DIRECTOR


~~ING. GERARDO FERRANDO BRAVO~~

GFR*RLLR*gtg

P

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

"APLICACIÓN DE TUBERÍAS EXPANDIBLES A LA PERFORACIÓN DE
POZOS EN AGUAS PROFUNDAS"

Tesis presentada por:

JESÚS SÁNCHEZ MARTÍNEZ

Dirigida por:

M.I. NÉSTOR MARTÍNEZ ROMERO

JURADO DEL EXÁMEN PROFESIONAL:

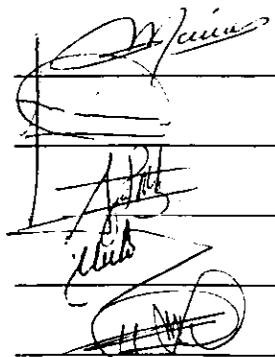
PRESIDENTE: ING. SALVADOR MACÍAS HERRERA

VOCAL: M.I. NÉSTOR MARTÍNEZ ROMERO

SECRETARIO: M.I. JOSÉ MARTÍNEZ PÉREZ

1ER. SPTE. M.I. JOAQUÍN MENDIOLA SÁNCHEZ

2DO.SPTE. M.I. MAXIMINO MEZA MEZA



The image shows four handwritten signatures, each written over a horizontal line. The signatures are: 1. A large, stylized signature that appears to be 'S. Macías Herrera'. 2. A signature that appears to be 'N. Martínez Romero'. 3. A signature that appears to be 'J. Martínez Pérez'. 4. A signature that appears to be 'J. Mendiola Sánchez'.

México, D.F., Septiembre de 2000.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por haberme permitido existir, gracias a la Virgen de Guadalupe y de Juquila por que no me dejaron solo.

Gracias a mi madre Odulvia Martínez Martínez por haberme apoyado en todos los momentos y por haber creído en mí, te quiero mucho.

Gracias a mis hermanos Miguel Ángel, Teresa Abigail y familiares por haber estado conmigo.

Gracias a Norma Angélica López Mercado por haberme acompañado en todos los momentos, T.E.A.M.O.

Gracias a los familiares de Norma Angélica, a sus padres y hermanos por haberse portado muy bien conmigo.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por haberme permitido estudiar en ella y a mis profesores y sinodales por haberme formado para ser un futuro Ingeniero Petrolero.

Gracias al Instituto Mexicano del Petróleo por haberme permitido realizar mi trabajo en sus instalaciones y al ingeniero Eliseo Álvarez y en especial al ingeniero Antonio Morales Díaz de Vivar por haberme apoyado en este trabajo.

Gracias a los ingenieros de PEMEX por haberme brindado su apoyo en la elaboración de este trabajo, al ingeniero Humberto Castro y en especial al ingeniero Juan Antonio Martínez Ramírez (Unidad de Perforación y mantenimiento de pozos Región Marina).

Gracias al Ingeniero Antonio de Jesús Albrete López (Gerencia de Tecnología) y al Ingeniero Marco Antonio de la Cruz Monroy (Activo de Explotación Pol-Chuc) por su ayuda en la elaboración de este trabajo, por sus consejos y por su amistad.

Gracias a mis compañeros y amigos por haber creído en mí, por los momentos bellos que hemos compartido con ustedes y por su amistad.

CONTENIDO

APLICACIÓN DE TUBERÍAS EXPANDIBLES A LA PERFORACIÓN DE POZOS EN AGUAS PROFUNDAS

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. ANTECEDENTES	3
1.1. Historia de aguas profundas	4
1.2. Tuberías de revestimiento	7
1.3. Situaciones en las que puede intervenir la tubería de revestimiento expandible	18
2. PROPIEDADES DE LAS TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO EXPANDIBLES	22
2.1. Los materiales	22
2.2. Tubería expandible	29
2.2.1. Tipos de tuberías de revestimiento expandibles	29
2.2.2. El acero expandible	29
2.2.3. El proceso de expansión	33
2.3. Tubería de revestimiento expandible ranurada	36
2.4. Tubería de revestimiento expandible sólida	42
2.5. Propiedades de las tuberías expandibles	45
3. APLICACIÓN DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO EXPANDIBLES	51
3.1. Clasificación de los sistemas de tubería expandible ranurada	52
3.1.1. Sistema de tubería de revestimiento corta expandible alternativa (ABL)	52
3.1.2. Sistema de tubería de revestimiento corta expandible para terminación (ECL)	60
3.1.3. Sistema ranurado de malla expandible para control de arena	62
3.2. Clasificación de los sistemas de tubería expandible sólida	67
3.2.1. Sistema de tubería corta de perforación expandible para agujero descubierto	71
3.2.2. Sistema de tubería corta expandible para agujero revestido	74
3.2.3. Sistema colgador expandible de tubería corta	77
3.3. Aplicaciones históricas	81
4. COSTOS	95
4.1. Investigación y tecnología	95
4.2. Ventajas de la tecnología expandible	98
4.2.1. Beneficios técnicos de la tecnología expandible	100
4.3. Beneficios económicos de la tecnología expandible	103
4.3.1. Comparación del costo de la tecnología	104
4.4. Análisis económico	107

CONTENIDO

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	Pág. 113
5.1 Conclusiones	113
5.2 Recomendaciones	116
BIBLIOGRAFÍA	118
TABLAS	
Tabla 1.1 Récor ds de algunos países con grandes tirantes de agua.	6
Tabla 1.2 Diferentes grados API de tuberías.	15
Tabla 2.1 Composición química (% en peso) de acero expandible utilizado.	44
Tabla 2.2 Propiedades mecánicas de TR grado L-80.	46
Tabla 2.3 Propiedades mecánicas de TR Grado K-55.	46
Tabla 3.1 Especificaciones de los sistemas de tubería corta de perforación expandible para agujero descubierto y tubería corta expandible para agujero revestido disponibles.	76
Tabla 3.2 Propiedades del yacimiento Gharif Medio.	82
Tabla 3.3 Resultados de las pruebas de campo del sistema ABL.	92
Tabla 4.1 Costos por concepto de tiempos de operación del pozo XX de la plataforma YY con tecnología convencional.	109
Tabla 4.2 Costos por conceptos de operación del pozo XX de la Plataforma YY utilizando tubería expandible ranurada (ABL).	110
Tabla 4.3 Comparación de costos de operación utilizando tecnología convencional y tubería expandible.	111
Tabla 4.4 Costos desglosados de la tubería expandible ranurada.	111
FIGURAS	
Figura 1.1 Relación típica entre las tuberías de revestimiento.	9
Figura 2.1 Diagrama esquemático de la curva esfuerzo–deformación para un material dado.	26
Figura 2.2 Mandril utilizado para expandir tubería.	34
Figura 2.3 Diagrama esfuerzo de formación del material.	34
Figura 2.4 Esquematación del efecto de expansión excedente.	35
Figura 2.5 Tubería expandible ranurada con mandril de expansión.	36
Figura 2.6 Curva de deformación de esfuerzo de cemento bajo carga flexural.	39
Figura 2.7 Característica comparativa de filtración de cemento solo y con fibra.	40
Figura 2.8 Sección limpia de tubería expandible ranurada en fibra cemento.	41
Figura 2.9 Gráfica del modelado del análisis de esfuerzo tangencial encontrado durante la expansión de tubería sólida.	43
Figura 2.10 Resultados del ensayo de impacto Charpy contra la temperatura de cuando son recibidas y expandidas las tuberías.	44
Figura 2.11 Modelo de tubería expandible modelada con elementos finitos (ABAQUS).	50

CONTENIDO

	Pág.
Figura 3.1 Herramienta corrediza.	53
Figura 3.2 Conector expandible superior.	54
Figura 3.3 Juntas ABL.	54
Figura 3.4 Conector expandible de fondo.	55
Figura 3.5 Secuencia del proceso del sistema ABL.	55
Figura 3.6 Esquema de herramienta corrediza y sarta de trabajo introducidos hasta la profundidad deseada.	56
Figura 3.7 Esquema de sarta de trabajo liberando herramienta.	57
Figura 3.8 Esquema mostrando el inicio del proceso de expansión.	57
Figura 3.9 Esquema mostrando expansión terminada.	58
Figura 3.10 Comparación de la tecnología convencional y el sistema ECL.	61
Figura 3.11 Componentes de las capas del sistema ESS.	63
Figura 3.12 Intercalación de las capas del sistema ESS cuando el proceso de expansión es alcanzado.	63
Figura 3.13 Esquema mostrando la reducción del desmoronamiento de la formación.	64
Figura 3.14 Esquema de tubería con pequeño espacio anular.	65
Figura 3.15 Sistema ESS colocado dentro de un agujero descubierto.	65
Figura 3.16 ESS colocada para tratamiento zonal y aislamiento.	66
Figura 3.17 Empacamiento interno y sistema ESS.	67
Figura 3.18 Comparación esquemática de un diseño convencional y un diseño con tubería de revestimiento expandible.	68
Figura 3.19 Tubería con elastómero.	70
Figura 3.20 Tubería sin elastómero.	70
Figura 3.21 Secuencia de corrida de un sistema de tubería corta expandible de perforación para agujero descubierto.	72
Figura 3.22 Secuencia de la corrida del sistema de tubería corta expandible para agujero revestido.	75
Figura 3.23 Esquema de colgadores de tubería corta, convencional y expandible.	77
Figura 3.24 Secuencia de la corrida del sistema colgador expandible de tubería corta.	78
Figura 3.25 Sistema colgador expandible de tubería corta.	80
Figura 3.26 Traslape del patrón de disparos y base de tubo expandido.	84
Figura 3.27 Componentes de terminación.	85
Figura 3.28 Secuencia de instalación del sistema de malla expandible para control de arena.	85
Figura 3.29 Historia de gasto de producción neto de aceite del campo Rahab.	86
Figura 3.30 Historia de la relación de producción bruta del campo Rahab.	87
Figura 3.31 Medidas de arena producida en el campo Rahab.	87
Figura 3.32 Registro UBI del sistema ABL cementado.	90
Figura 4.1 Costos de la Investigación por tipo de Investigación.	97
Figura 4.2 Comparación de un diseño de pozo convencional contra pozos que usan tuberías expandibles, con la misma capacidad de producción.	101
Figura 4.3 Beneficios de costos relativos para un pozo convencional y el Sistema Ranurado de Malla Expandible.	104

CONTENIDO

	Pág.
Figura 4.4 Comparación del costo de la tubería convencional y el Sistema de Tubería de Revestimiento Corta Expandible Alternativa, ABL.	105
Figura 4.5 Costo final de tecnología convencional y el Sistema ABL.	106
Figura 4.6 Estado mecánico.	107

INTRODUCCIÓN

La necesidad de producir hidrocarburos en forma más efectiva, económica y segura, ha originado que la tecnología en la perforación de pozos petroleros tenga una investigación continua, lo que ha llevado al desarrollo de nuevas técnicas, que hacen posible la explotación de yacimientos que en otros tiempos no lo eran.

Tal es el caso de la aplicación de tuberías de revestimiento expandibles, que comenzó a mencionarse en la literatura mundial a partir de 1996. En México pocas personas relacionadas con la industria tienen conocimiento de la misma, por ser muy reciente. Sin embargo esta tubería tiene algunas ventajas, en la explotación de yacimientos ya que se podrán perforar pozos con diámetros menores o si se inicia con un diámetro convencional, al utilizar la tubería expandible, se podrán terminar pozos con un mayor diámetro que el convencional. Así como reducir los costos en fluidos, cemento, tubería, capacidad de equipo, área de acostar tubería y con esto se logra reducir el costo total aproximadamente un 30% con respecto a un pozo convencional.

Asimismo la tubería expandible es útil para aguas profundas, ya que actualmente el 33% de la producción mundial de petróleo y el 24 % de la de gas provienen del sector marino, donde existe transición de baja hasta alta presión y donde es usual para los operadores utilizar de 6 a 8 diámetros de tubería de revestimiento desde la superficie hasta el fondo del mismo.

En este trabajo se describirán los dos tipos de tuberías de revestimiento existentes: tubería de revestimiento ranurada y tubería de revestimiento sólida.

La tecnología expandible podrá ser usada en todas las fases de la vida del pozo incluyendo perforación, terminación e intervención del pozo.

Un ejemplo donde puede utilizarse esta tubería es en la construcción de pozos la cual esta basada en un telescopiado de agujero desde la cabeza hasta el fondo del pozo lo que resulta en impracticos diámetros de agujero o más seriamente, resultar en una falla al alcanzar el objetivo final. Por otro lado utilizando la tubería se reduce el riesgo de abandonarlo, dando con esto un gran potencial a los yacimientos, debido a que menos pozos fallarán.

Así la tubería expandible podrá ser usada en pozos que produzcan aceite y gas y alcanzar yacimientos que no se pueden acceder fácilmente con métodos habituales, para expandir tubería de revestimiento in situ, el tamaño del agujero puede ser mantenido y alcanzado con un mínimo telescopiado de pozo.

Por otro lado se tocarán aspectos como las propiedades de las tuberías después de la expansión para analizar la factibilidad de esta.

Con este trabajo se pretende entender mejor este tipo de tecnología, y se podrá analizar más a fondo para poder pensar en aplicarla en áreas del territorio nacional, específicamente en la Zona Marina, ya que se especula que en un futuro traerá grandes beneficios.

En otro ámbito el pozo prospecto para utilizar la tecnología debe cubrir requerimientos en costos de operación, rentabilidad y si cubre esto, la factibilidad de implementarla crece.

El objetivo de este trabajo es establecer el estado del arte de la tecnología de tuberías de revestimiento expandibles de pozos en aguas profundas, así como realizar un análisis para darla a conocer debido a que en México no existen trabajos escritos sobre esta tecnología y posteriormente aplicarla en territorio nacional, ya que actualmente las actividades exploratorias en México marcan una tendencia cada vez más alejadas de la costa y por consiguiente a una mayor profundidad, lo que indica que se debe poner más énfasis en estas tareas, para poder adecuar la tecnología expandible a este tipo de condiciones, teniendo en cuenta que ya ha sido probada en ambientes severos como el Mar del Norte y Golfo de México en la parte de Estados Unidos.

De lo anterior se puede apreciar la importancia de conocer e investigar sobre la tecnología de tuberías expandibles con el fin de optimizar la explotación de los hidrocarburos que se encuentran en nuestro país y en diversas partes del mundo, en beneficio de la industria petrolera.

Se proporcionan los elementos necesarios para poder hacer el análisis y aceptar o rechazar la factibilidad de la aplicación en algún pozo o yacimiento que tengamos en cuestión.

Así también, se pretende generar la suficiente inquietud para no pasar por alto la misma y pensar seriamente en su aplicación.

1. ANTECEDENTES

Se mencionará la importancia de la perforación en aguas profundas, así como la descripción de las características y tipos de tuberías que se utilizan para la perforación convencional, marcando la importancia de las mismas y como afectan al objetivo y las situaciones en las que podría intervenir la tubería de revestimiento expandible.

Desde la segunda mitad de este siglo, la industria del petróleo y del gas se ha consolidado como la principal abastecedora de energía para la humanidad ya que es indispensable para la vida diaria y sin este combustible la vida sería diferente. En este sentido, México ha sido afortunado al proveerle la naturaleza con grandes reservas de hidrocarburos, cuya explotación racional ha sido generadora de innumerables fuentes de trabajo y ha contribuido al erario nacional de manera muy importante, vía captación de divisas por las exportaciones e internamente por la venta de sus productos.

En años recientes se ha ido tornando cada vez más complicada la explotación de los recursos energéticos, ya que la era del petróleo fácil se terminó al encontrarse éste en lugares cada vez más remotos o de difícil acceso, como los campos petroleros marinos, un ejemplo de ello es el campo Cantarell ubicado en el Golfo de México cerca de Cd. del Carmen, Campeche.

La forma de extraer de manera rentable estos hidrocarburos, depende fundamentalmente de las tecnologías que se empleen a lo largo de toda la cadena productiva, desde la exploración hasta los centros de procesamiento por ello este trabajo está dirigido hacia las tuberías de revestimiento, que son parte esencial dentro de la perforación; ya que son utilizadas para proteger a la formación y acuíferos del posible daño, así como proteger al pozo cuando existen presiones anormales, entre otras múltiples aplicaciones.

En las temporadas de precios bajos en el petróleo (tal como ocurrió en 1981 y 1986), la industria deberá reaccionar elevando nuevamente su eficiencia y buscando solucionar los problemas que se deriven de la caída de los precios. En el caso de exploración y producción a nivel mundial dichos precios afectan directamente el desarrollo de recursos petroleros en áreas de difícil acceso y altos costos, como pueden ser tirantes de agua ultraprofundos y que algunas compañías ya están empezando a atacar.

Podemos recordar el caso de 1998 donde el precio del petróleo cayó a niveles históricos, sin embargo la industria petrolera mundial fue capaz de reaccionar a ese escenario y continuar operando de manera rentable.

Para México, la situación no es muy diferente, ya que deberá mejorar sus diferentes procesos para adaptarse a dichos precios y aún cuando volvieran a subir, continuar sus operaciones con costos bajos de producción, empleando nueva tecnología.

Se deberá continuar la exploración en el mar de manera intensiva, sin descuidar como una acción importante las aguas más profundas, donde el potencial de México es enorme, a pesar de los altibajos de los precios del petróleo.

1.1 HISTORIA DE AGUAS PROFUNDAS

Durante la década de los 90's la industria internacional del petróleo y del gas, experimentó un crecimiento limitado, la producción total mundial aumentó a un promedio de sólo un 1.3% anual y hubo dos años en los que la producción decreció.

En contraste, el sector marino ha logrado una alta tasa de crecimiento, la producción del petróleo en aguas internacionales ha aumentado a un promedio anual del 5.4% desde 1990 y la de gas a un 6.1%.

Actualmente, el 33% de la producción mundial de petróleo y el 24% de la de gas provienen del sector marino. Estas proporciones han aumentado significativamente desde 1990 y es probable que esta tendencia continúe por lo menos durante unos años.

Gran parte de ese incremento se debe a las aportaciones del Mar del Norte donde se ha registrado un auge en la producción tanto del petróleo como del gas, particularmente en aguas de Noruega y el Reino Unido. Otros lugares de gran actividad han sido el Extremo Oriente y África Occidental.

Aunque la exploración y producción suelen ser mucho más costosas en el mar que en tierra, el interés y las oportunidades en el sector marino siguen acrecentándose. Esto se debe principalmente a la madurez de los yacimientos terrestres en muchos países y a los recientes adelantos en tecnología marina.

Actualmente, la industria marina es bastante menos importante en América Latina que en el resto del mundo (con las notables excepciones de Brasil y México). En parte, esto es debido a la geología de la región pero también refleja la relativa inmadurez de la exploración marina en algunos países.

Cuando la perforación en tierra haya aumentado mucho más, es probable que el sector marino reciba más atención.

Algunas de las acciones de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) han servido de estímulo para desarrollar provincias marinas tales como el Mar del Norte. Los aumentos de precio en los años 1970 y principios de los 80's animaron a la industria a hallar fuentes alternativas y a reducir su dependencia del Medio Oriente.

El alto precio de adentrarse en las provincias petroleras marinas fue posible costearlo gracias a los elevados precios del petróleo a principios de la década de 1980. Aunque los precios han bajado considerablemente desde entonces, los adelantos técnicos han permitido que las operaciones marinas puedan competir con las demás. Algunos ejemplos de estos avances son la perforación horizontal, los sistemas de producción flotantes y los sistemas submarinos.

Actualmente la tendencia ha sido hacia la perforación en aguas cada vez más profundas. Se han logrado algunos éxitos extraordinarios en Brasil y en el Golfo de México y se espera que las operaciones sigan adentrándose en mayores profundidades por todo el mundo.

México tiene todavía un gran potencial petrolero en el mar, no solamente en áreas donde tradicionalmente ha operado y que se localizan en tirantes menores de 100 metros, sino que el potencial se extiende a tirantes de agua mayores de 200 metros, pero deberá prepararse técnicamente para perforar, desarrollar y explotar estructuras petroleras que pudieran ser descubiertas en aguas profundas en los próximos diez años, y que muy probablemente serán las que sustituyan al petróleo que actualmente se obtiene en México.

A la fecha se ha perforado hasta cerca de 200 metros de tirante de agua y se tienen planes para perforar alrededor de los 400 metros, en el futuro inmediato. Por esta razón, un reto que tiene la industria es contar con capacidad tecnológica para incursionar, inclusive, en tirantes de agua todavía mayores, ya que si este problema nos invade, la industria petrolera perderá oportunidades y continuará rezagándose en términos de la utilización de la mejor tecnología para aprovechar los recursos naturales.

PAÍSES QUE HAN PERFORADO EN AGUAS PROFUNDAS

El mundo petrolero ha enfocado recientemente su atención al desarrollo de yacimientos en aguas profundas.

Países tales como Indonesia y Egipto han estado haciendo importantes descubrimientos petroleros en aguas profundas; Israel ha perforado también en aguas profundas en el mar Mediterráneo, Malasia ha perforado su primer pozo exploratorio y otros países que serían Turquía, Australia, Nueva Zelanda, como se

muestra en la Tabla 1.1. Así gracias a la investigación y al desarrollo tecnológico actuales se puede perforar en aguas cada vez más profundas.

Tabla. 1.1 Récords de algunos países con grandes tirantes de agua.

País	Nombre del pozo	Tirante de agua metros
Israel		778
Malasia		736
Turquía	Limon Koy-1	850
Nueva Zelanda	Wake Noi-1	1467
Australia (Planeando)	3 pozos	1219
Brasil	Campo Roncador	2100

CRECIMIENTO DE LA PERFORACIÓN MARINA EN MÉXICO

Inicialmente los pozos se perforaban en forma vertical. Posteriormente, la necesidad de abatir costos en la perforación marina propició el desarrollo de trayectorias desviadas pero dirigidas a objetivos definidos, lo que dio paso a pozos direccionales.

La evolución tecnológica llevó a pozos horizontales y de alcance extendido con herramientas denominadas sistemas de navegación. Por otra parte, las trayectorias no convencionales como reentradas y los multilaterales han permitido explotar áreas no alcanzadas por los pozos de trayectorias convencionales, y explotar varios yacimientos simultáneamente, dando como resultado adicional un incremento importante en la producción de campos en explotación.

Los avances actuales de la perforación de pozos están enfocados a evitar el daño a la formación productora, como es el caso de la formación de nuevos fluidos de perforación y la perforación bajo balance. La tecnología para perforación de pozos con agujero reducido y la tubería flexible para el uso de la perforación, terminación y mantenimiento de pozos están en pleno desarrollo, así como en poco tiempo la tecnología de tubería expandible.

México es el mayor productor de petróleo marino de América Latina y el segundo mayor productor de gas, después de Venezuela. En 1996 su producción total de petróleo ascendió a 163.6 millones de toneladas (casi el 5% de la producción mundial). Para el mismo año, la contribución de los campos marinos representó el 51% de la producción total de campos marinos en América Latina y el 10% en el mundo. En 1996 la producción petrolera procedente del mar representó el 69% del total de producción del país, mientras que la contribución del gas de campos marinos fue el 50% de la producción nacional.

Es posible que México aumente su producción de petróleo y gas debido a que ha aumentado la probabilidad de grandes descubrimientos en el mar, sin embargo, la producción total de México podría bajar en un 5% anual dentro de uno o dos años si la perforación y la producción marina en aguas profundas no se convierte en una prioridad como parte de la moderna estrategia de perforación, puesto que la prioridad de Pemex se centra en el reacondicionamiento de campos productores.

El principal desarrollo marino actual es el proyecto Cantarell que consiste en mejorar los campos existentes como Akal, Nohoch, Chac y Kutz y desarrollar campos nuevos que no son de Cantarell tales como el Zaap-Maloob y el Uech.

Pemex tiene la firme intención de ir avanzando hacia aguas más profundas del Golfo de México, la mayoría de los campos existentes están en tirantes de agua de menos de 100 metros pero espera perforar en aguas de hasta 500 metros de profundidad. Este tipo de exploración no tendrá un impacto a corto plazo pero podría inaugurar una nueva fase en el desarrollo de la industria marina.

El mercado mundial del petróleo se caracteriza por la fuerte competencia. En este sentido, las empresas líderes en la exploración y extracción de hidrocarburos buscan reducir sus costos a partir de incrementar la eficiencia operativa y se empeñan en mejorar sus tecnologías y organizaciones.

En México existen áreas de oportunidad para avanzar en el uso y la asimilación de tecnologías de alto impacto y en el despliegue de las capacidades y habilidades técnicas y profesionales, que mejoren su posición competitiva.

La poca evolución en los últimos años del desarrollo tecnológico en el sector petrolero nacional frente al entorno internacional, plantea la necesidad de considerar las restricciones fundamentales al desarrollo y competitividad de la industria.

La aplicación de nuevas tecnologías en la industria petrolera del país, ha estado generalmente determinada por la evolución de éstas a nivel internacional, debido a la escasa innovación interna.

1.2 TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO

Para poder tener un mejor entendimiento de la tecnología de tubería expandible, es conveniente señalar a las tuberías de revestimiento convencionales, que es en sí revestir el propósito de las dos tecnologías dependiendo de diversos factores.

Las tuberías de revestimiento son la parte esencial al perforar un pozo, ya que estas contienen con la ayuda del cemento las paredes del mismo (sin este no se llevaría a cabo el fin para lo cual fueron creadas).

FUNCIONES

El conjunto de tuberías de revestimiento y cemento ademan el pozo, realizando las siguientes funciones:

- ✓ Evitan los derrumbes de las paredes del pozo.
- ✓ Previenen la contaminación de los acuíferos dulces de la intrusión de fluidos del pozo.
- ✓ Impiden la contaminación proveniente de zonas problema (ácido sulfhídrico, formaciones salinas, etc.).
- ✓ Confinan la producción del intervalo seleccionado al aislar la zona productora del agua del yacimiento.
- ✓ Suministran un medio para la instalación del equipo de control del pozo.
- ✓ Permiten la instalación de equipo para la determinación del pozo o para su producción a través de sistemas artificiales.

CLASIFICACIÓN

Naturalmente que el programa ideal sería el de una tubería de revestimiento desde la superficie hasta la formación productora, sin embargo, debido a que durante la perforación se penetra a una variedad de formaciones y cada una de ellas presenta diferentes problemas, se introducen en el pozo y en forma concéntrica, varias tuberías de revestimiento, que se clasifican de acuerdo a sus funciones específicas:

- ✓ Tuberías de revestimiento superficiales.
- ✓ Tuberías de revestimiento intermedias.
- ✓ Tuberías de revestimiento explotación.
- ✓ Tuberías de revestimiento cortas.
- ✓ Tubería de producción.
- ✓ Sarta de revestimiento de enlace (Tie - Back).

Un esquema típico de estas tuberías de revestimiento así como sus posiciones se puede observar en la Figura 1.1.

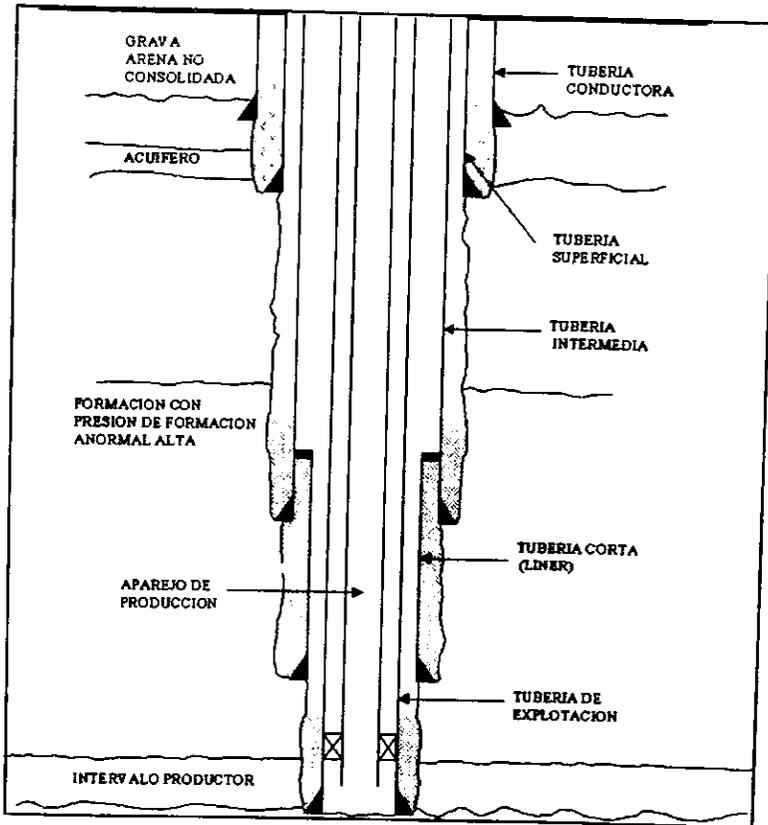


Figura 1.1 Relación típica entre las tuberías de revestimiento.

TUBERÍA CONDUCTORA

Esta tubería no es una tubería clasificada como tubería de revestimiento por el API y por lo tanto no se encuentra dentro de las tablas API. La tubería conductora puede ser una tubería especial sin costura, de línea o simplemente una serie de tambores metálicos soldados.

Esta es la primera sarta de tubería corrida o cementada en el pozo, la cual se coloca aproximadamente entre los 30 y 100 metros de profundidad para soportar los cabezales de las tuberías subsiguientes.

En formaciones muy blandas o poco consolidadas, esta tubería se pilotea en la formación, en tanto que en formaciones más duras o compactas, se requiere de la perforación previa de un agujero somero antes de correr y cementar la tubería.

El propósito principal de esta tubería es el de proporcionar un conducto para la circulación del fluido de perforación, desde la superficie hasta la barrena y de regreso, debido a que las formaciones superficiales, por lo general tienden a ser erosionadas severamente por el flujo del lodo y por lo tanto se deben de proteger con tubería.

Una función adicional de la tubería conductora es la de minimizar los problemas de derrumbes ya que las formaciones no consolidadas se derrumban si no están protegidas con revestimiento. En términos generales, la perforación en estas zonas se realiza empleando fluido viscoso a elevados gastos de circulación.

Los diámetros de estas tuberías varían de 16 a 30" y dependen del programa y profundidad del pozo, generalmente esta sarta es de poca longitud.

TUBERÍA SUPERFICIAL

Esta es la segunda tubería que se coloca dentro del agujero al perforar un pozo. Las razones para colocarla son:

- ✓ Cubrir y proteger los acuíferos, permitiendo la conservación del ambiente.
- ✓ Mantener la integridad del agujero previniendo derrumbes.
- ✓ Minimizar las pérdidas de circulación en zonas someras y permeables.
- ✓ Proporcionar un medio para la instalación de las conexiones superficiales de control (conjunto de preventores).
- ✓ Soportar el peso de todas las sarts de tuberías de revestimiento subsecuentes, excepto liners o tuberías cortas.

TUBERÍAS INTERMEDIAS

Estas tuberías se colocan después de la tubería superficial y su función principal es la de cubrir las zonas con presiones de formación anormalmente altas.

Debido a que las zonas con presión anormal requieren altas densidades del fluido para su control, las formaciones superiores más débiles deberán ser protegidas para evitar pérdidas de circulación o pegaduras por presión diferencial.

Ocasionalmente estas tuberías se emplean para aislar formaciones salinas o zonas problema tales como lutitas hinchables, deleznales, H_2S , CO_2 , $NaCl$, entre otras.

Frecuentemente es posible usar 2 o más sarta de revestimiento intermedias dependiendo de la profundidad del pozo así como de las contingencias que se presenten.

TUBERÍA CORTA O LINER

El uso de esta tubería dependerá del diseño del pozo. Estas tuberías se emplean con los mismos propósitos que las tuberías de revestimiento intermedias, la diferencia es que en lugar de ser corridas o cementadas hasta la superficie, se cementan desde el fondo del pozo hasta una profundidad más somera, estas se colocan en el interior de la tubería de revestimiento intermedia, con un traslape entre las dos tuberías de entre 100 y 300 metros. En este caso la tubería intermedia está expuesta a las mismas consideraciones de perforación que el liner.

Los liner o tuberías cortas se emplean frecuentemente como una alternativa para aislar las presiones de formación o fractura a un menor costo que el que implica correr una sarta hasta la superficie.

Cuando se emplea un liner, la sarta de tubería de revestimiento superior expuesta, comúnmente deberá de ser evaluada con las consideraciones de presión interna y de colapso de la presión del agujero debajo del liner.

TUBERÍA DE EXPLOTACIÓN

Esta tubería es la última en instalarse en el pozo y llega hasta la zona productora.

La sarta de revestimiento de explotación o producción es la tubería de revestimiento colocada ligeramente arriba, a la mitad o debajo de la formación productora. Sus funciones son las siguientes:

- ✓ Aislar la zona productora de otras formaciones y de fluidos indeseables, tales como agua o gas de formaciones anteriores.

- ✓ Proporcionar un conducto de trabajo con diámetro conocido en el intervalo productor.
- ✓ Proteger el equipo o sarta de producción.
- ✓ Tener control del yacimiento por explotar.
- ✓ Explotar el pozo.
- ✓ Anclar herramientas.

Todas las tuberías de ademe que se introducen al pozo, antes de la tubería de revestimiento de explotación, tienen funciones muy importantes, pero no de la trascendencia que tiene la de explotación, que es determinante en la vida del pozo. Un mal diseño de esta tubería puede traer como consecuencia erogaciones substanciales que tienen que hacerse para corregir un error de esta naturaleza.

TUBERÍA DE PRODUCCIÓN (DE REVESTIMIENTO)

Esta tubería sirve como vía de flujo para los fluidos producidos, así como para la instalación cómoda del equipo de extracción artificial en la producción del pozo, confinando la producción hacia la sección de flujo.

La principal función de esta tubería es permitir la extracción del hidrocarburo de una forma óptima, ya que la extracción depende de varias características del pozo como pueden ser: potencial del pozo, gasto, presión de fondo fluyendo, entre otras.

Es importante hacer notar que en el caso de algunos campos marinos de México, se utiliza la tubería de revestimiento de explotación como tubería de producción, esto es debido a los altos gastos de producción.

En general, las tuberías de revestimiento de explotación y de producción son la misma sarta.

SARTA DE REVESTIMIENTO DE ENLACE (TIE - BACK)

Las tuberías de revestimiento cortas a menudo se emplean como una parte de la sarta de revestimiento de explotación, en lugar de correr una sarta completa desde el intervalo productor hasta la superficie.

Una vez instalada la tubería corta, se puede extender o conectar hasta la superficie o cualquier otra profundidad predeterminada mediante una tubería de

revestimiento llamada tubería de enlace o tie back. Este es un procedimiento común cuando la zona productora está detrás del liner o la sección más profunda no es comercial.

Estos componentes de las tuberías de revestimiento, se corren para:

- ✓ Reforzar las tuberías de revestimiento intermedias desgastadas durante la perforación del pozo.
- ✓ Proporcionar mayor resistencia contra los derrumbes debido a presiones anormales.
- ✓ Proporcionar protección contra la corrosión.
- ✓ Sellar una fuga de gas en la boca de la tubería de revestimiento intermedia.

El enlace posterior puede o no extenderse a la superficie, cubriendo la parte superior de una tubería de revestimiento que ya exista. Se llama revestimiento parcial (o stub) cuando se extiende desde la parte superior de la tubería de revestimiento corta de explotación hasta una cierta profundidad predeterminada (que no es la superficie).

Este revestimiento más corto puede ser colocado con su peso completo sobre el revestimiento de explotación o puede ser colgado sobre la tubería de revestimiento intermedia que se encuentre en el pozo.

RISER MARINO

El riser marino únicamente se mencionará, ya que es importante en la perforación en aguas profundas y es toda una tecnología.

En la perforación marina, se utiliza esta tubería ascendente que sirve para proporcionar un conducto entre el lecho marino y la plataforma de perforación, para operar la tubería de perforación y demás herramientas al interior del pozo y evitar la comunicación de los fluidos del pozo con el medio marino.

Un riser marino debe ser diseñado de tal forma que resista con seguridad los efectos del medio ambiente y operaciones. Las olas, mareas y fuertes corrientes que actúan en el riser crean fuerzas significativas y algunas veces vibración. El riser es una parte muy costosa del equipo de plataforma que debe ser manejado cuidadosamente.

ESPECIFICACIONES

Un diseño apropiado de sartas de tuberías de revestimiento normalmente proporciona un número determinado de secciones de tubería con especificaciones diferentes. Es muy importante que estas secciones de tubería se corran en el pozo en un orden adecuado, de lo contrario se presentará alguna falla; por ejemplo si alguna junta es mal colocada, esta sarta puede fallar por tensión (desprenderse).

Es indispensable conocer las fuerzas que intervienen al correr y colocar la tubería de revestimiento en el pozo, para que de esta manera se pueda seleccionar el tamaño, grado y peso adecuado.

Es importante conocer las propiedades físicas de las tuberías, así como el tipo de conexión incluyendo en ellas la resistencia a la presión interior, a la presión exterior (colapso o aplastamiento) y a la deformación por efecto de peso (tensión).

Las características principales de una tubería de revestimiento son:

- ✓ Diámetro
- ✓ Grado
- ✓ Rango
- ✓ Peso
- ✓ Junta
- ✓ Drift
- ✓ Rosca

DIÁMETRO. Éste es exterior e interior, el diámetro exterior no cambia aun cuando la tubería sea de diferentes pesos. El diámetro exterior y el espesor de pared determinan una propiedad más, que es el peso unitario.

GRADO. Especifica la composición del acero o el material con que está fabricado el tubo. Los grados de la tubería son identificados con letras y números, los cuales indican características del acero, en cada grado API el número designa el esfuerzo de cedencia, así por ejemplo la tubería P-110, puede soportar un esfuerzo de $110,000 \text{ lb/pg}^2$ con una elongación menor al 0.5 %.

La Tabla 1.2 indica los grados de tuberías API empleados en la industria petrolera.

Tabla 1.2 Diferentes grados API de tuberías.

Grados API	Mínimo esfuerzo (lb/pg ²)	Máximo esfuerzo (lb/pg ²)
H-40	40,000	80,000
J-55	55,000	80,000
K-55	55,000	80,000
C-75	75,000	90,000
L-80	80,000	95,000
N-80	80,000	110,000
C-95	95,000	110,000
P-110	110,000	140,000
V-150	150,000	—

Además de los grados API, existen otros grados de acero que son usados en la industria para condiciones específicas, tales como:

- ✓ Alto esfuerzo a la tensión.
- ✓ Alto esfuerzo al colapso.
- ✓ Resistencia del acero al sulfhídrico, etc.

RANGO. Es la longitud del tubo, existen tres tipos:

- ✓ Rango 1 (R1) de 4.88 – 7.62 metros.
- ✓ Rango 2 (R2) de 7.63 – 10.36 metros.
- ✓ Rango 3 (R3) de 10.37 metros en adelante.

En México el rango más utilizado es el rango 3.

PESO. Es el correspondiente a la unidad de longitud, ya sea en Km/m o lb/pie, y este es de gran utilidad para los diseños y para cuando se maniobra esta misma ya sea en tierra o en el mar.

JUNTA. Es la unión que tiene el tubo en uno de sus extremos, existen dos tipos:

- ✓ Con cople.
- ✓ Sin cople e integral.

DRIFT. Es el diámetro interior garantizado del fabricante o diámetro de trabajo, es importante debido a que no podemos introducir ninguna herramienta que exceda este diámetro, ya que estaríamos exponiéndonos a que se tuviera un posible accidente mecánico por quedar atrapada la herramienta dentro de la tubería.

ROSCA. Es el maquinado que se le hace a cada tubo en los extremos, los hay de varios tipos, estos tipos de rosca van en ambos extremos del tubo, por eso, cuando se trata de utilizar tuberías con roscas diferentes se recurre a una combinación.

La diferencia de las roscas estriba en el ángulo, la rosca del tubo está en función de la resistencia y grado del tubo. Al diseñar las tuberías de revestimiento por tensión deberá revisarse tanto la resistencia del cuerpo del tubo como el tipo de rosca y el tipo de junta.

ESFUERZOS A LOS QUE ES SOMETIDA LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO

Las tuberías de revestimiento se encuentran sujetas a tres esfuerzos principales:

1. Presión externa (presión de colapso).
2. Presión interna.
3. Carga axial (tensión).
4. Cargas combinadas de los anteriores.

PRESIÓN EXTERNA. Es la capacidad de la tubería de revestimiento para soportar presión externa sin experimentar alguna falla. La determinación de la resistencia al colapso, sin considerar la tensión o compresión axial, varía en función de la zona (del comportamiento mecánico del material) que se localice. El colapso puede encontrarse en la zona plástica, de transición o rompimiento: esta determinación puede hacerse para cualquier tubería que satisfaga las normas API, si se conoce el diámetro exterior, espesor y esfuerzo mínimo de cedencia.

PRESIÓN INTERNA. Es la capacidad de la tubería de revestimiento para soportar presión interna sin experimentar alguna falla. Esta puede ocurrir con cementaciones forzadas y fracturamientos o cuando la tubería esta sujeta a presiones internas altas.

El exceso de presión interna puede ocasionar ruptura y por ello, en ese momento, se le denomina presión interna de ruptura (o de cedencia). La falla tiende a ocurrir cuando se aplica un esfuerzo que excede al esfuerzo de cedencia, resultando una deformación permanente en la tubería.

Debido a que es un factor importante es necesario tomar en cuenta este al llevar a cabo el diseño de sargas de tuberías.

CARGA AXIAL (TENSIÓN). En cierto punto de la sarga de tubería de revestimiento, el colapso deja de ser el factor de control importante en el diseño y la tensión tiende a causar falla por efecto de deformación longitudinal y reduce la resistencia al colapso de la tubería.

Existen diferentes cargas de tensión que actúan sobre la tubería de revestimiento:

1. El peso propio de la tubería suspendida en el aire.
2. La fuerza debida a la flotación de tubería sumergida en el fluido de perforación.
3. Las cargas de impacto ocasionadas durante la introducción de la sarga.
4. Los cambios de temperatura después de cementar la tubería.
5. La elevada presión del fluido dentro de la tubería de revestimiento.
6. Cargas de pandeo o flexión de la tubería de revestimiento.

La mayoría de las situaciones mencionadas son difíciles de evaluar, es por ello que al efectuar el diseño se considera la situación más crítica, que es la tubería colgando libremente, seleccionándose un factor de diseño elevado.

IMPORTANCIA DE LOS COSTOS

Según las estadísticas a nivel mundial muestran que en pozos en tierra todas las sargas de tuberías de revestimiento representan del 15 al 20 % del costo total del pozo, dependiendo de los diseños óptimos, así como para diseños no óptimos del 25 al 28 %.

Generalmente la tubería de revestimiento representa uno de los puntos de mayor costo en el trabajo de perforación de un pozo, por lo que la columna ideal sería aquella cuyo peso fuese el más ligero y del menor grado de acero posible, pero que permitiese no fallar, ante los esfuerzos y condiciones ambientales a los que

fuese expuesta. La tubería de revestimiento óptima es la que satisface los requerimientos de cargas a los que va a estar expuesta a menor costo.

Actualmente se requiere de un número determinado de tuberías de revestimiento para perforar, y esto eleva los costos, requiriéndose equipos de perforación grandes, ya sea en tierra o en el mar. Al introducirse menos sargas se disminuyen los costos y el tamaño del equipo.

1.3 SITUACIONES EN LAS QUE PUEDE INTERVENIR LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO EXPANDIBLE

Los problemas encontrados en aguas profundas son diversos, dependen de varios factores, como pueden ser: tirantes de agua, localización geográfica, ambientes severos, tipo de formación entre otros. Estos representan un gran reto y podemos combinarlos sirviéndonos de diferentes tipos de herramientas.

Dentro de los retos que enfrenta el ingeniero petrolero para lograr el control de un pozo en aguas profundas se encuentran:

- ✓ Bajos gradientes de fractura.
- ✓ Flujos someros de agua.
- ✓ Inestabilidad mecánica del pozo.
- ✓ Nuevos diseños de tubería de revestimiento.
- ✓ Nuevas técnicas de control de pozos.
- ✓ Rápida detección de brotes.
- ✓ Procedimientos especiales para matar el pozo.
- ✓ Gas acumulado en el riser.
- ✓ Bolsas de gas atrapadas en los preventores.
- ✓ Formación de hidratos, entre otros.

De ahí la necesidad de utilizar una tubería de revestimiento que pueda cumplir y cubrir estas características necesarias de operación al realizar diversos trabajos en aguas profundas.

La industria petrolera mundial cuenta con unidades flotantes capaces de perforar en tirantes de agua de 2000 metros o más, en los que todos los sistemas, incluidos desde el lecho marino hasta la superficie se han desarrollado. Para tirantes grandes aún queda por resolver el diseño del pozo en sí. Una de los mayores problemas es determinar la profundidad de asentamiento de las tuberías de revestimiento.

Los factores clave en la determinación de las profundidades de asentamiento de tuberías de revestimiento de pozos en aguas profundas, son:

- ✓ Gradientes de presión de sobrecarga de la formación debido al tirante de agua.
- ✓ Presión de formación y densidades de fluido asociadas.
- ✓ Gradiente de presión de fractura de la formación.
- ✓ Márgenes aceptables para control de brotes y prevenir pérdidas de circulación, usualmente entre 0.06 y 0.12 g/cm³ (0.5 y 1.0 lb/gal).

Para combatir estos problemas, las opciones que se tienen cuando el tirante de agua es muy grande son:

- ✓ Uso de más sargas de tuberías de revestimiento.
- ✓ Conjunto de preventores y risers de mayor capacidad.
- ✓ Uso de doble tren de preventores.
- ✓ Uso de tuberías de revestimiento expandible (correr dos sargas del mismo diámetro).
- ✓ Reducción de la densidad del fluido de perforación arriba del fondo marino mediante el uso de un sistema de doble densidad.

Las tuberías de revestimiento expandibles actualmente son un tipo de tecnología que se encuentra en la etapa de prueba. Tienen diversas aplicaciones. Sin embargo, la que concierne en este caso a la industria petrolera es la consistente en la solución de los problemas de flujo de agua somera, bajos gradientes de presión de fractura, uso de numerosas sargas de revestimiento y de estabilidad del pozo que es la solución a problemas descritos.

PROPÓSITOS CON LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO EXPANDIBLE

- El propósito primordial de esta tubería es dejar un agujero de pozo con un mínimo de telescopiado en sartas de revestimiento.
- Se pretende revestir el interior de las tuberías de revestimiento dañadas o desgastadas y aumentar su capacidad a la presión interna.
- Mediante el uso de menos sartas de revestimiento, y la reducción del tiempo de equipo se espera reducir el costo en un 30% aproximadamente, comparado con los gastos realizados en la perforación convencional.
- En el caso de la perforación en el mar, las plataformas requeridas cumplen con ciertas características de peso, resistencia a mareas y viento, si se logra tener menos peso, iniciando a perforar con menores diámetros para utilizar la tubería expandible la plataforma reducirá considerablemente su tamaño y el costo.
- Dentro de la perforación a nivel internacional el mayor problema se centra en la perforación en aguas profundas, ya que aquí es donde las inversiones son enormes y las inclemencias del tiempo y tirantes de agua exigen una tecnología de vanguardia como lo es la tubería de revestimiento expandible.

ÁREAS EN MÉXICO DONDE SE PRETENDE IMPLEMENTAR ESTA TECNOLOGÍA

Con el advenimiento de los descubrimientos de yacimientos petrolíferos en tirantes de aguas cada vez más profundos, surge la necesidad de utilizar tecnología sofisticada que permita la explotación de dichos campos. La Zona Marina de la Bahía de Campeche es hoy en día una área de gran interés por sus posibilidades productivas por ello es aquí donde se pretende inicialmente implementar la tecnología de tubería expandible.

El estado actual de la tecnología muestra la factibilidad de desarrollo de campos de la Región Marina de Petróleos Mexicanos, esto debido a que las características del área no son tan severas y las condiciones no son tan críticas como aquellas encontradas en ambientes agresivos, como lo son el Mar del Norte, o los campos de Albacora y Marlim en Brasil, o bien, los grandes tirantes de agua encontrados en la parte norte del Golfo de México.

Entre las características críticas se cuentan: la ubicación geográfica (latitud, longitud), las condiciones climáticas extremas, el estado promedio de las corrientes marinas, la topografía del suelo marino y, sobre todo, la profundidad del tirante de agua.

Mientras que la tecnología para el desarrollo de campos a nivel mundial se encuentra en auge en profundidades que van más allá de los 2,000 metros, en la Región Marina de México se tienen planes de explotación para rangos de profundidad de entre 100 y 500 metros de tirante de agua. Con esto se enfatiza el hecho de que se tiene todo ese camino recorrido y no se dejan entrever mayores problemas técnicos para conseguir dichos desarrollos, es decir, existe la tecnología para tales planes, entre esta tecnología se encuentra la tubería expandible.

2. PROPIEDADES DE LAS TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO EXPANDIBLES

Se mencionarán primeramente los materiales ya que forman la base para encontrar un acero ideal para las tuberías de revestimiento expandibles, aquí se tocarán aspectos importantes en la conformación del acero, así como a las propiedades tanto de los materiales como de tuberías expandibles ya que son un punto clave para el correcto funcionamiento, estas se analizaron antes y después de la expansión debido a que una vez deformada en el pozo, la tubería expandida tiene diferentes propiedades, que traen dificultades al momento de ser calculadas. Se mencionarán algunas de las propiedades de las tuberías expandibles como: dureza, esfuerzo de cedencia, esfuerzo final de tensión y elongación.

También la composición química del acero es un punto importante dentro de estas tuberías, así, se mencionarán los elementos químicos del acero estudiado como C, Cr, Ni, Mo, Mn, Si, P, S, Ti, Nb, Cu, V, Al, los cuales son utilizados en la tubería expandible sólida, otro punto importante que se menciona, es la resistencia al impacto contra la temperatura de prueba.

Para saber hacia donde nos estamos dirigiendo, el objetivo de esta tecnología es desarrollar un tamaño uniforme que pueda expandirse por dentro del agujero, reduciendo el efecto telescópico que limita los programas actuales de tubería en aguas profundas. Actualmente se desarrollan nuevas técnicas para trabajos en ambientes severos, a fin de proporcionar seguridad en las operaciones.

2.1 LOS MATERIALES

Para poder entender mejor el comportamiento de la tubería expandible es conveniente conocer los materiales, sus propiedades y características ya que son parte importante y de ellos depende el correcto funcionamiento de las mismas. En el acero intervienen materiales del tipo metal, en la fibra cemento materiales compuestos y en el elastómero materiales polímeros, también se menciona la forma en que reaccionan con algún efecto o ensayo.

Los materiales se clasifican según su uso en cuatro grupos: metales, cerámicos, polímeros y materiales compuestos.

METALES. Los metales y las aleaciones, que incluyen al acero, aluminio, magnesio, zinc, hierro fundido, titanio, cobre, níquel y muchos otros, tienen como características generales una adecuada conductividad o conformabilidad, y resistencia al impacto. Son particularmente útiles en aplicaciones estructurales o de carga, aunque en ocasiones se utilizan en forma pura, normalmente se prefiere

el empleo de sus combinaciones (denominadas aleaciones), para mejorar ciertas propiedades deseadas o permitir una mejor combinación en las mismas.

CERÁMICOS. Los materiales cerámicos como los ladrillos, el vidrio, la loza, los aislantes y los abrasivos, tienen escasa conductividad tanto eléctrica como térmica, y aunque pueden tener buena resistencia y dureza, son deficientes en ductilidad, conformabilidad y resistencia al impacto, por lo anterior son menos usados que los metales en aplicaciones estructurales, no obstante, presentan en su mayoría una excelente resistencia a las altas temperaturas y a ciertas condiciones de corrosión. Muchos de ellos tienen propiedades ópticas, eléctricas y térmicas excepcionales.

POLÍMEROS. En éstos se incluyen el caucho (hule), los plásticos y muchos tipos de adhesivos los cuales se producen creando grandes estructuras moleculares a partir de moléculas orgánicas obtenidas del petróleo o productos agrícolas, en un proceso conocido como polimerización.

Los polímeros tienen baja conductividad eléctrica y térmica, escasa resistencia mecánica y no se recomiendan para aplicaciones en temperaturas elevadas. Algunos polímeros (los termoplásticos) presentan excelente ductilidad, conformabilidad y resistencia al impacto, mientras otros (los termoestables) tienen las propiedades opuestas. Son ligeros y con frecuencia cuentan con excelente resistencia a la corrosión.

MATERIALES COMPUESTOS. Los compuestos o compósitos están constituidos por dos o más materiales que generan propiedades no obtenibles mediante uno solo; ejemplos típicos aunque burdos son el concreto, la madera contrachapada (triplay), la fibra de vidrio, así como la fibra cemento.

Con los compuestos se fabrican materiales ligeros, resistentes, dúctiles, con resistencia a las altas temperaturas las cuales no pueden obtenerse de otro modo, de igual manera se elaboran herramientas de corte muy resistentes al impacto que de otra manera serían quebradizas.

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Los materiales tienen propiedades mecánicas, las cuales se tienen que conocer para un correcto funcionamiento del producto, en este caso de la tubería expandible.

PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas determinan como responde el material al aplicársele una fuerza o esfuerzo y las más comunes son la resistencia mecánica, la ductilidad y la rigidez del material, aunque a menudo interesa saber cómo se comporta el material cuando se expone a un choque repentino e intenso (impacto), a esfuerzos repetidos cíclicamente en un periodo dado (fatiga), a temperaturas elevadas (termofluencia), o cuando se somete a acciones abrasivas (desgaste).

Las propiedades mecánicas no solo determinan el comportamiento del material en operación, sino que influyen en la facilidad con que puede ser conformado en un producto de servicio.

Una pieza metálica forjada (la expansión de la tubería), debe soportar la aplicación rápida de una fuerza sin romperse, y tener suficiente ductilidad para adquirir la forma adecuada (en el caso del mandril).

PROPIEDADES FÍSICAS

Dentro de las propiedades físicas se incluyen los comportamientos eléctrico, magnético, óptico, térmico y elástico. Las propiedades físicas dependen tanto de la estructura como del procesamiento de los materiales. Las propiedades químicas comprenden, entre otras, las fuerzas de enlace (debido a la composición) y su comportamiento ante medios agresivos (corrosividad).

EFFECTOS AMBIENTALES

La relación estructura–propiedades–procesamiento recibe también la influencia del medio circundante al que se somete el material.

CARGA. El tipo de fuerza, o carga, que actúa en el material puede cambiar radialmente su comportamiento. El esfuerzo de fluencia, por arriba del cual el material experimenta un cambio permanente en sus dimensiones, es la propiedad más crítica y suele ser la consideración más importante en el diseño de un componente. Un material con alto esfuerzo de fluencia puede fallar fácilmente con cargas menores si la carga es cíclica (fatiga) o se aplica súbitamente (impacto).

TEMPERATURA. Los cambios de temperatura alteran las propiedades de los materiales, la resistencia en la mayoría disminuye conforme aumenta la temperatura, así pueden ocurrir cambios súbitos desastrosos cuando se calientan por encima de las temperaturas críticas.

Los metales que han sido endurecidos por cierto tratamiento térmico o mediante alguna técnica de conformado, pueden perder repentinamente su resistencia cuando son calentados. Las temperaturas bajas pueden causar que el material falle por fragilidad aun cuando la carga aplicada sea baja. De igual manera las altas temperaturas pueden modificar la estructura de las sustancias cerámicas o provocar que los polímeros se derritan o carbonicen.

CORROSIÓN. Por definición, la corrosión es la destrucción de un metal por reacciones químicas o electroquímicas con su medio ambiente. Los metales son atacados por diversos líquidos corrosivos los cuales son degradados uniforme o selectivamente, desarrollando grietas o picaduras que conducen a una falla prematura. Las sustancias cerámicas son atacadas por cerámicos en estado líquido, mientras que los polímeros pueden ser disueltos por sustancias disolventes.

CONCEPTOS BÁSICOS

Para una correcta comprensión de los materiales que se utilizan en las tuberías es recomendable mencionar algunos conceptos básicos.

ESFUERZO. El esfuerzo se define como la fuerza aplicada entre el área afectada.

$$\text{Esfuerzo } \sigma = \frac{F}{A}$$

DEFORMACIÓN. La deformación es el grado en que se deforma un material por unidad de longitud en un ensayo de tensión.

$$\text{Deformación } \epsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$$

La curva esfuerzo-deformación se utiliza normalmente para registrar los resultados de un ensayo de tensión (Figura 2.1). Esta figura permite visualizar en que región se encontrará el acero de la tubería expandible durante y al final de la expansión y de esta manera imaginarnos el fenómeno tomando en cuenta los esfuerzos.

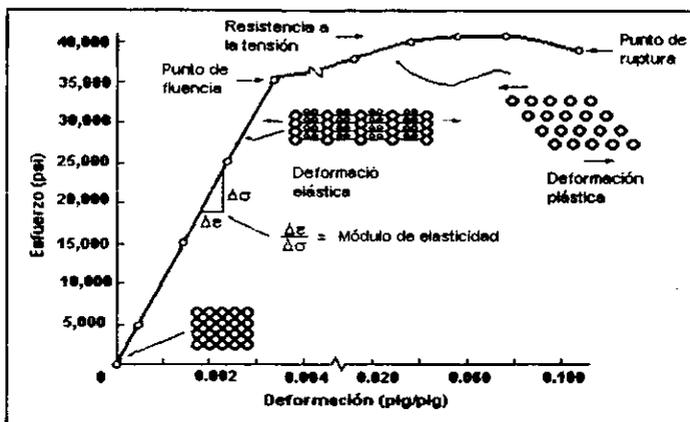


Figura 2.1 Diagrama esquemático de la curva esfuerzo-deformación para un material dado.

DEFORMACIÓN ELÁSTICA

Al aplicar una fuerza a un sólido, los enlaces entre los átomos se estiran y el material se alarga, cuando se retira la fuerza regresan a su longitud original y el sólido vuelve a su tamaño original, la deformación en esta porción es elástica y la curva esfuerzo-deformación no es permanente. En otras palabras es la deformación del material que desaparece cuando se anula o retira la carga.

DEFORMACIÓN PLÁSTICA

Si las fuerzas aplicadas al sólido son mayores, el material se comporta de una manera plástica. Cuando se incrementa el esfuerzo, las dislocaciones empiezan a producirse, ocurre el deslizamiento y el material empieza a deformarse plásticamente. A diferencia de la deformación elástica, la deformación ocasionada por el deslizamiento es permanente, el esfuerzo en que se inicia el deslizamiento es el punto que limita los comportamientos elástico y plástico. De otra manera, es la alteración permanente de la longitud del material cuando se aplica una carga y después se retira.

ESFUERZO DE CEDENCIA (O FLUENCIA)

El esfuerzo de cedencia es aquél en que el deslizamiento se hace notorio e importante. Si se diseña un componente que deba soportar una fuerza durante su uso, debe asegurarse que no se deforme plásticamente, por ejemplo, el cigüeñal de un motor de automóvil no funcionará adecuadamente cuando se deforme más

allá de lo especificado esto sucederá también con la tubería expandible. Por esto debe seleccionarse un material que tenga un alto punto de fluencia o agrandar el componente lo suficiente para que la fuerza aplicada produzca un esfuerzo por debajo del esfuerzo de fluencia.

RESISTENCIA A LA TENSIÓN

La resistencia de la tensión es el esfuerzo de mayor fuerza aplicada, y por ello es el esfuerzo máximo que ocurre en la curva esfuerzo-deformación. En muchos materiales dúctiles, la deformación no permanece uniforme debido a la dirección de las partículas o granos.

La resistencia a la tensión es relativamente poco importante para la selección de los materiales o para la fabricación. El esfuerzo de fluencia determina si el metal se deformará o no, y por ello es más importante.

MÓDULO DE ELASTICIDAD

El módulo de elasticidad (o módulo de Young) es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en la región elástica. El cual se representa de la siguiente forma:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \text{módulo de elasticidad.}$$

DUCTILIDAD

La ductilidad es el grado de deformación que un material puede soportar sin romperse. Existen dos procedimientos para describir la ductilidad, los cuales son elongación y disminución o reducción del área.

Los materiales dúctiles exhiben una curva esfuerzo deformación que llega a su máximo punto de resistencia a la tensión. En materiales más frágiles, la carga máxima o resistencia a tensión ocurre en el punto de falla.

EFECTOS TÉRMICOS

Las propiedades de la tensión son afectadas de manera importante por la temperatura. El esfuerzo de fluencia, la resistencia a la tensión y el módulo de

elasticidad disminuyen a temperaturas elevadas, en tanto que la ductilidad, como medida del grado de deformación en la fractura, comúnmente se incrementa.

TIPOS DE ENSAYOS

Los ensayos son pruebas para describir el comportamiento mecánico de los materiales y determinar sus propiedades.

El comportamiento mecánico de los materiales se describe mediante sus propiedades mecánicas, que son simplemente los resultados idealizados de ensayos. Estas pruebas están diseñadas para representar diferentes tipos de condiciones de carga.

La mención de estos ensayos, es porque algunos de ellos se le realizaron a la tubería expandible y más adelante se hablará de ello.

ENSAYO DE TENSIÓN. El ensayo de tensión mide la respuesta de un material a la aplicación gradual de una fuerza uniaxial, de él se obtienen el esfuerzo de fluencia, la resistencia a la tensión, el módulo de elasticidad y la ductilidad.

ENSAYO DE FATIGA. Mide la resistencia de un material a la falla cuando se aplica repentinamente un esfuerzo (cíclico) inferior al punto de fluencia.

ENSAYO DE IMPACTO. Mide la capacidad de un material para absorber la aplicación repentina de una carga sin romperse. El ensayo Charpy es una prueba comúnmente utilizada con tal objeto.

ENSAYO DE TERMOFLUENCIA. Es el ensayo que mide la resistencia de un material a la deformación y a la fractura cuando se somete a una carga estática inferior al esfuerzo de fluencia a temperaturas elevadas.

La termofluencia se define como la deformación plástica a temperaturas elevadas. Es difícil que llegue a ocurrir termofluencia en tuberías de revestimiento, ya que la temperatura a la que se lleva a cargo la termofluencia varía de acuerdo al material y no es alcanzada esta con las temperaturas existentes en los yacimientos.

ENSAYO DE DUREZA. El ensayo de dureza mide la resistencia de un material a la penetración de un objeto punzante, los ensayos comunes son Brinell, Rockwell, Knoop y Vickers.

Además de medir la resistencia al desgaste y a la abrasión del material, puede correlacionarse con otras propiedades mecánicas.

Aunque se utilizan muchas otras pruebas, incluyendo algunas muy especializadas, para describir el comportamiento mecánico, las propiedades obtenidas con estos cinco ensayos son las más comunes presentadas en los manuales.

2.2 TUBERÍA EXPANDIBLE

La tubería de revestimiento expandible fue desarrollada para reemplazar tubería intermedia y hacerlo sin reducir el diámetro del agujero del pozo. Esta tubería expandible es utilizada en la extracción de hidrocarburos. El uso del sistema expandible se lleva a cabo por la expansión de la tubería debido a la fuerza del diablo a través de la tubería de perforación, esta expansión es el resultado del trabajo del acero en frío dentro del agujero.

Por definición, una vez deformada en el pozo la tubería expandida tiene diferentes propiedades, la gran dificultad viene cuando estas nuevas propiedades tienen que ser calculadas y se contemple como afectan en otras aplicaciones.

Actualmente se desarrollan nuevas técnicas para trabajos en ambientes severos, a fin de proporcionar seguridad en las operaciones

2.2.1 TIPOS DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO EXPANDIBLES

Existen en la industria de aceite y gas dos tipos de tuberías de revestimiento que son expandidas in situ, por la fuerza del diablo, los cuales son:

- ✓ Tubería de revestimiento expandible ranurada.
- ✓ Tubería de revestimiento expandible sólida.

Ambas tuberías tienen una alta resistencia, y son de acero dúctil, así como deferentes sistemas que más adelante se mencionarán.

2.2.2 EL ACERO EXPANDIBLE

Encontrar el material para expandir no fue simple, ya que para este dispositivo se requiere tener grandes propiedades como: alta resistencia de acero con alta ductilidad, así como también se prefiere trabajar con endurecimiento. El trabajo de endurecimiento (temple) permite a la resistencia incrementarse cuando se

expande, en el caso de la tubería cuando se expande esta la resistencia se incrementa, debido a factores como la orientación de las partículas del acero.

Para obtener materiales con estas propiedades no usuales se desarrollaron trabajos con tubería y acero manufacturados especialmente para estos fines.

"El primer prototipo original fue probado en la Haya, alrededor de 1993, la tubería fue construida de un acero especial automotivo, similar al usado en una zona arrugada de un automóvil".^{1/}

TRABAJO EN FRÍO

El acero es trabajado en frío durante el proceso de expansión. De esta forma se expanden los dos tipos de tuberías.

El trabajo en frío es la deformación de un metal a una temperatura inferior a la de recristalización, durante este trabajo el número de dislocaciones se incrementa, provocando que el metal se endurezca mientras se conforma.

Cuando se desea producir una pieza mediante un proceso de deformación o trabajo en frío, el esfuerzo aplicado debe sobrepasar el esfuerzo de fluencia para que el metal se deforme permanentemente en una forma útil.

PROPIEDADES CONTRA EL PORCENTAJE DE TRABAJO EN FRÍO

Se utilizan muchas técnicas para conformar y endurecer simultáneamente un metal por trabajo en frío, en el caso de tubería expandible se utiliza un mandril para dar la forma final a la tubería, la cantidad de endurecimiento por deformación se regula controlando la cantidad de la deformación aplicada.

Cuando se incrementa el trabajo en frío, tanto el esfuerzo de fluencia como la resistencia a la tensión se incrementan, sin embargo, la ductilidad disminuye y tiende a cero.

^{1/} Expandable tubulars solutions. Andrei Filippor, Et al. Annual Technology Conference and Exhibition held in Houston, Texas 3-6 Octubre de 1999.

El metal se rompe si se intenta proporcionar mayor trabajo en frío, por esto, existe una cantidad máxima de trabajo en frío o deformación que se puede aplicar a un metal. En el caso de la tubería expandible se tiene que utilizar el arreglo del diablo que proporciona la compañía, ya que este es el trabajo en frío óptimo para expandir la tubería sin que se presente algún problema.

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DESPUÉS DE LA DEFORMACIÓN

Es posible predecir las propiedades de un metal si conocemos la cantidad de trabajo en frío que se alcanzó en el para decidir si el componente tiene las propiedades adecuadas en los sitios críticos.

Para el diseño del proceso de deformación se establecen las dimensiones originales del material, lo cual permite efectuar las combinaciones deseables de propiedades y dimensiones finales y para lo cual es necesario calcular el porcentaje de trabajo en frío necesario y las dimensiones originales del metal.

Durante la deformación se produce una estructura fibrosa conforme se alargan los granos dentro del material, esta estructura favorece al proceso.

CARACTERÍSTICAS DEL TRABAJO EN FRÍO

Existe cierto número de ventajas y de limitaciones del endurecimiento de un metal trabajado en frío o endurecido por deformación, las cuales se mencionan a continuación:

1. Se endurece el metal simultáneamente mientras se le da la forma final deseada.
2. Se obtienen excelentes tolerancias dimensionales y acabados superficiales.
3. Es un método de bajo costo.
4. Si se intenta mucha deformación el metal puede fallar durante el procesamiento.
5. La ductilidad, la conductividad eléctrica y la resistencia a la corrosión se deterioran por este método.
6. Los esfuerzos residuales y el comportamiento anisotrópico pueden generarse durante este método. Estas características pueden ser tanto útiles como perjudiciales, dependiendo de la manera en que sean controladas.
7. Algunas técnicas de deformación pueden llevarse a cabo sólo si se aplica el trabajo en frío. Por ejemplo, la expansión de la tubería expandible.

En el caso de tubería expandible el diablo realiza el trabajo en frío sobre el material. La tubería expandible es trabajada en frío en la región plástica.

No hay que preocuparse por la temperatura que soportara la tubería ya expandida en el pozo, ya que ésta no debilitará las características de la misma, la temperatura puede ayudar en vez de perjudicar a eliminar los esfuerzos residuales, por medio de la recuperación o recocido.

ESFUERZOS RESIDUALES CAUSADOS POR LA DEFORMACIÓN

Son los esfuerzos introducidos al material durante el procesamiento de deformación, los cuales, más que causar una deformación del material, permanecen almacenados en la estructura, la remoción posterior de los esfuerzos en forma de deformación es problemática.

Cuando se aplica un esfuerzo al metal una pequeña porción del mismo, quizá un 10%, queda dentro de la estructura como una red de dislocaciones, estos esfuerzos residuales aumentan la energía total de la estructura.

Los esfuerzos residuales no se encuentran uniformemente distribuidos en todo el material deformado.

ORIENTACIÓN PREFERENCIAL CAUSADA POR LA DEFORMACIÓN

Es el alineamiento de granos, inclusiones u otras características microestructurales en una dirección o plano particulares en un material como resultado de su procesamiento.

Debido a esta orientación el material se hará mas resistente o menos resistente según el propio diseño.

RECUPERACIÓN

Es la eliminación de los esfuerzos residuales producidos durante la deformación sin reducir la resistencia del material trabajado en frío mediante un tratamiento térmico de baja temperatura diseñado para ello.

Se siguen investigando técnicas de recuperación para el tratamiento de la tubería expandible dentro del pozo.

2.2.3 EL PROCESO DE EXPANSIÓN

El proceso de expansión ocasiona deformaciones plásticas del tubo cuando el diablo es manejado a través de este como resultado en el incremento de esfuerzo residual en el tubo expandido, la aplicación específica depende de la naturaleza de este esfuerzo y como ello afecta el tubular elegido.

El proceso de expansión se lleva a cabo de forma diferente en cada tipo de tubería:

- En la tubería expandible ranurada se lleva a cabo de la parte superior de la tubería hacia la parte inferior.
- En la tubería expandible sólida se lleva a cabo de forma contraria a la tubería ranurada, es decir, de la parte inferior de la tubería hacia la parte superior de la misma.

DIABLO O MANDRIL

El término diablo es comúnmente empleado en la industria para un dispositivo móvil que se inserta en líneas de tuberías para limpiar depósitos cuando existen parafinas, sales, y otros minerales que son significativos para obstruir el paso del fluido a través de la tubería.

El diablo en el caso de tubería de revestimiento expandible se refiere a un pequeño mandril de varios cilindros telescópicos que se mueve rápidamente en el interior del agujero del pozo para aumentar el diámetro de la tubería. El diablo al que se hará referencia será únicamente éste.

El mandril, o diablo es usado para deformación mecánica permanente del tubo, la Figura 2.2 muestra el cuerpo del mismo.

Tiene la particularidad de que para poder realizar la expansión de la tubería requiere un recubrimiento con óxido de zirconio, el cual ofrece muy poca fricción y experimenta muy poco desgaste, ya que algunos tienen que pasar a través de varios cientos de metros de tubo, y el óxido de zirconio hace posible estas jornadas prolongadas. Se continúa usando el mismo diablo hasta alcanzar la expansión total de la tubería.

La fuerza pasa a través del diablo y puede ser bombeado, empujado o jalado a través de la tubería, en otras palabras el diablo es usado para transmitir presión a través del mismo por tracción directa o fuerza de empuje debido a sus propiedades y dependiendo del arreglo que se tenga.

La deformación del metal de la tubería ocurre en la región plástica de acuerdo al diagrama de esfuerzo de formación del material en cuestión, como se ilustra en la Figura 2.3.

El diseño de este mandril es bastante crítico, así como el material usado en la fabricación de este.

Las propiedades del fluido de lubricación que se requieren para desplazar el diablo son uno de los principales problemas en la expansión de la tubería.

Por otro lado se están llevando a cabo estudios para utilizar un sistema de fluidos que garantice las propiedades de lubricación requeridas, este sistema debe ser compatible con el sistema de fluidos convencional y no debe causar daño ambiental.

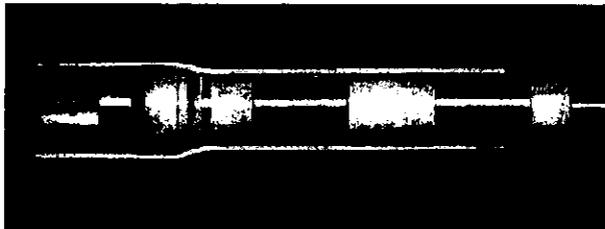


Figura 2.2 Mandril utilizado para expandir tubería.

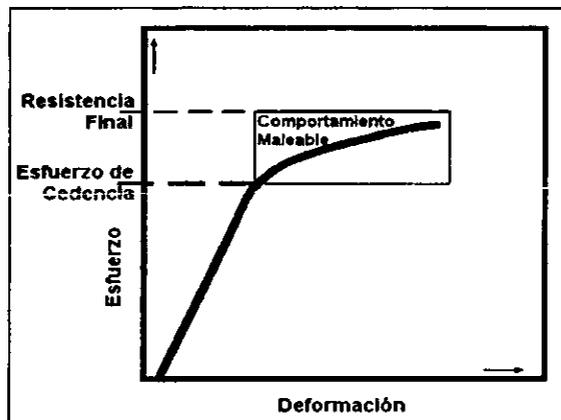


Figura 2.3 Diagrama esfuerzo de formación del material.

RAPIDEZ DE DEFORMACIÓN

Es importante tomar en cuenta la velocidad o rapidez a la cual el material es deformado ya que un material se puede comportar de manera muy diferente si se le aplica una fuerza de conformado lentamente o si se le aplica súbitamente mediante un impacto.

La velocidad de desplazamiento del mandril es un factor importante que debe considerarse en el diseño y operación de la tubería expandible.

Un valor típico de velocidad del mandril utilizado para expandir la tubería es:

- ✓ 300 metros/hora en tuberías expandibles ranuradas.
- ✓ 100 metros/hora en tuberías expandibles sólidas.

EXPANSIÓN EXCEDENTE

Una característica de la tecnología de tubería expandible es la expansión excedente, la cual se recomienda debido a las características del trabajo en frío que en conjunto con el diablo permiten que el diámetro sea aumentado un 10% del diámetro del mismo.

La expansión excedente ofrece estabilidad dentro de terminaciones con pozo abierto, esta característica se da en las tuberías expandibles ranuradas y también en las tuberías expandibles sólidas (Figura 2.4).

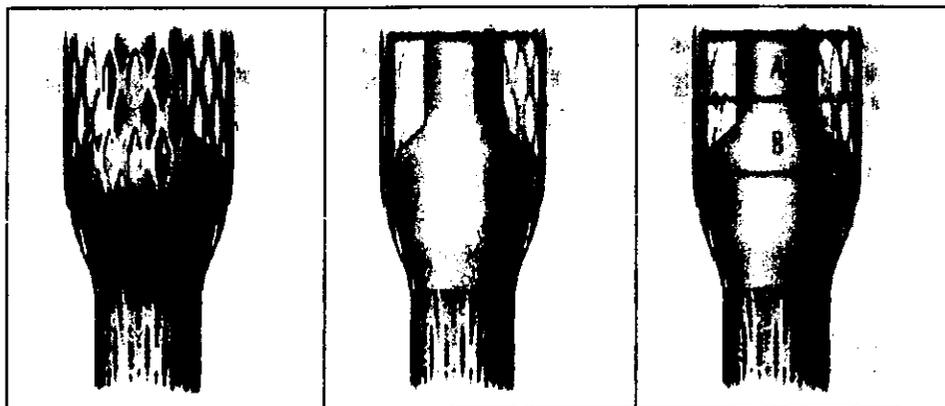


Figura 2.4 Esquematización del efecto de expansión excedente.

2.3 TUBERÍA DE REVESTIMIENTO EXPANDIBLE RANURADA

La tubería de revestimiento ranurada es esencialmente un tubo con una serie de ranuras, sobrepuestas en un eje. La plantilla de ranuras es expandida in situ por un mandril que viaja a través de esta, el patrón de ranuras permite al tubo expandirse más fácilmente que un tubo sólido.

El diámetro exterior del mandril es más grande que el diámetro interno de la tubería expandible. Ya expandida la tubería tiene un diámetro interno aproximadamente del 10% mayor que el diámetro exterior del mandril, esta expansión excedente puede ser alterada con la plantilla ranurada y metalurgia.

El efecto de expansión excedente facilita al mandril ser recuperado y permitir a la tubería ranurada ejercer un esfuerzo en contra del agujero.

La tubería ranurada puede ser fabricada en casi todos los tamaños y puede ser expandida hasta 200% de su diámetro externo original, permitiendo a la misma tubería expandible ser desplegada a través de la tubería de revestimiento, esta expansión depende de las dimensiones de las ranuras (Figura 2.5).

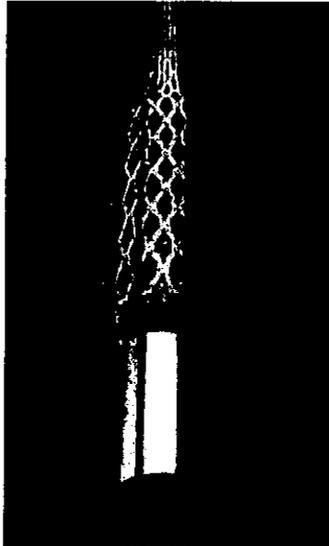


Figura 2.5 Tubería expandible ranurada con mandril de expansión.

Su principal propósito es asegurar temporalmente la integridad de una sección del pozo para permitir operaciones de perforación, continuando a través de zonas más profundas y con sobrepresión o en zonas agotadas (depressionadas).

La tubería es instalada debajo de la tubería de revestimiento anterior sin o con mínima reducción del diámetro del agujero.

La tubería de producción final colocada a través de la tubería expandible debe ser de acero convencional, diseñada para largos periodos de presión de integridad.

Durante las operaciones de perforación la tubería combinada con fibra cemento, puede mantener un diámetro en el agujero mientras se eliminan las necesidades de tuberías intermedias a través de zonas problema.

Esta tubería a diferencia de la tubería expandible sólida puede introducirse en una o varias secciones para ir aislando zonas problema sin que se disminuya el diámetro de la tubería de revestimiento anterior y quedará un agujero con varias secciones de esta tubería con un mismo diámetro.

LAS RANURAS

Se pretende que el término ranura englobe cualquier corte o maquinado para debilitar al tubo y facilitar la expansión radial, incluyendo ranuras que solo se extienden parcialmente a través de la tubería y que permiten a las secciones remanentes adelgazadas que se extiendan.

La tubería expandible tiene múltiples ranuras traslapadas extendidas longitudinalmente y al menos alguna de las ranuras es más ancha en uno o en ambos extremos, los extremos anchos de las ranuras deben ser simétricos en relación a los respectivos ejes longitudinales de estas, estos extremos son expandidos por medio de otras ranuras transversales colocadas en los extremos de las mismas y no se pueden utilizar ranuras de otros tipos tales como agujeros redondos.

Al expandirse el diámetro de la tubería causa una reducción en longitud comúnmente del 1% para un 50% de expansión en el diámetro, esto dependerá del diseño de las ranuras.

Las ranuras únicamente se encuentran en las tuberías ranuradas en las sólidas no ya que estas tienen otras características, variando su forma y sus propiedades.

EL CEMENTO

El cemento es diseñado para mayor tiempo de fraguado, permitiendo a la tubería expandible ranurada ser expandida antes de que fragüe el cemento. El cemento que se utiliza para las tuberías expandibles ranuradas es especial, y es llamado fibra cemento. Este ha sido empleado en varias aplicaciones como: obturación, estabilización de agujero y en pérdida de circulación de fluido (zonas de lutitas y sales), además para combinarlo con tuberías expandibles.

Esta fibra cemento proporciona una fuerza mayor a la tensión y debe ser suficientemente dúctil. El cemento ordinario Portland, que es usado en cementaciones de tuberías de revestimiento convencionales, tiene buena fuerza de compresión pero relativamente menor fuerza de tensión.

La lechada de la fibra cemento se bombea en campo con una unidad de bombeo triplex, la cual es combinada con una bomba centrífuga de rebombeo.

La fibra es preparada para mayores tiempos de fraguado y para proporcionar mejor consistencia cuando ya ha sido fraguada, alrededor del 1.5% del volumen de fibra cemento contiene la lechada.

La fibra consiste de polypropileno o nylon. A la fecha la mayoría de las fibras cemento que se han utilizado en las operaciones han usado fibras de polypropileno en concentraciones de 1 a 1.5 % en peso.

La fibra con polypropileno es utilizada en aplicaciones con temperaturas arriba de 120 °C. Para altas temperaturas (arriba de 200 °C) se debe usar la fibra con nylon. El enjarre que comúnmente se ha utilizado ha sido de 12 milímetros de grosor.

La combinación del cemento clase G y fibra con polypropileno tienen excelentes resultados, ya que se puede revestir con un bajo coeficiente de fricción.

DESCRIPCIÓN DE LAS GRIETAS

Cuando el recubrimiento uniforme de cemento limpio falla en tensión, se forman una o más grietas y el fluido presurizado (o lodo) fluye fácilmente a través de ellas.

La matriz de fibra cemento falla primero formando micro grieta, y luego las fibras sustituyen las cargas. Como el esfuerzo crece, las fibras se estrechan y las micro grietas se abren, estas fibras grietas encajadas dan una alta resistencia al fluido de filtración.

Las Figuras 2.6 y 2.7 comparan el típico diagrama esfuerzo/tensión y datos de filtración para cemento solo y fibra cemento. En la Figura 2.6, LOP es el límite de proporcionalidad y UFS es el esfuerzo flexural final.

La prueba que se realizó fue conducida con un aceite hidráulico y en pruebas similares donde se utilizó lodo (todo menos aceite hidráulico), este selló las pequeñas grietas y la filtración fue sorprendentemente reducida.

Cuando las muestras de fibra cemento son sometidas a cargas de alto impacto, la matriz de cemento se rompe en pedazos, pero la fibra sostiene a la matriz unida, de ahí que la integridad estructural sea retenida, es decir, los trocitos de fibra cemento desgastados son mantenidos en la matriz de cemento por las fibras, y solamente una pequeña superficie nueva desgastada se encuentra expuesta, lo que no es usual con fórmulas normales de cemento.

Se piensa que la razón por la cual la fibra cemento tiene alta resistencia al desgaste es porque es un fenómeno similar, es decir, debido a que se desgasta la parte superficial esto le proporciona mayor consistencia, sellando sus grietas.

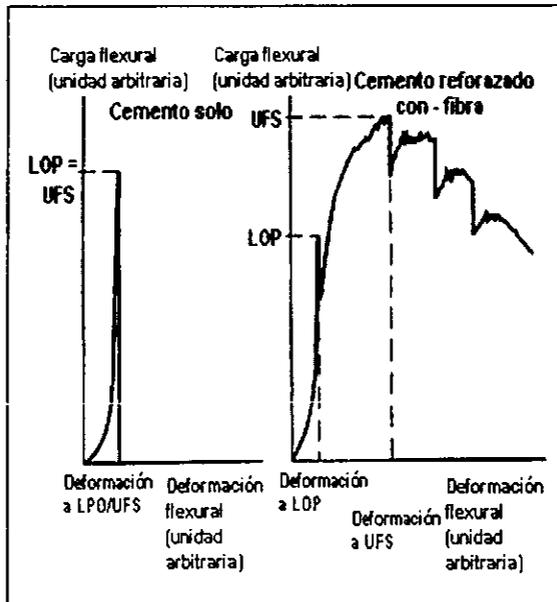


Figura 2.6 Curva de deformación de esfuerzo de cemento bajo carga flexural.

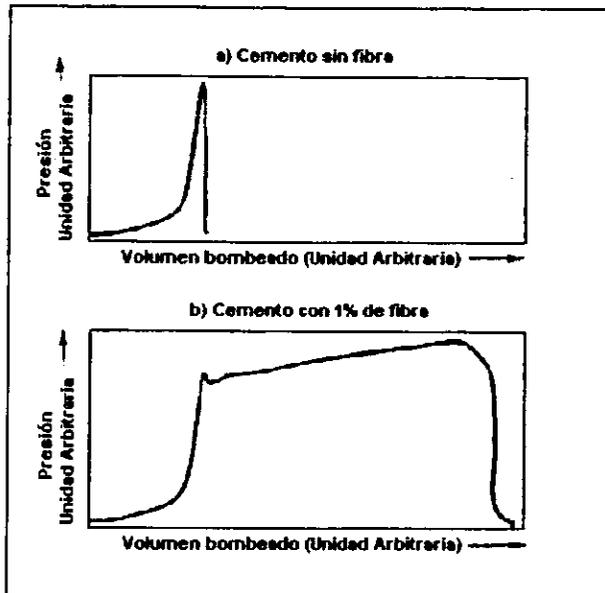


Figura 2.7 Característica comparativa de filtración de cemento solo y con fibra.

MAGNITUD DE LA FUERZA DE EXPANSIÓN DE LA TUBERÍA EXPANDIBLE RANURADA

La magnitud de la fuerza mecánica para expandir la tubería está relacionado al número de ranuras en la tubería, la cual entre menor sea su número mayor será la fuerza de expansión. Además, la tubería expandible con muchas ranuras es más propensa al fracturamiento y a que ocurra una falla catastrófica de la misma durante la expansión, volviéndose más susceptible al daño durante el manejo e instalación de la misma dentro del agujero.

Sorprendentemente se encontró que incrementar el ancho de los extremos de las ranuras, sin aumentar la parte restante de la ranura, reduce la fuerza requerida para expandir la tubería sin reducir la resistencia significativamente.

La magnitud de la fuerza que se requiere para expandir una tubería ranurada aproximadamente es un treintavo de la fuerza que se requiere para expandir una tubería sólida del mismo diámetro.

Para expandir una tubería de 11 3/8" se requiere aproximadamente una presión de 63.33 psi y para expandir una tubería de 3 1/3" se requiere una presión de 190 psi. Así, para expandir un sistema ABL de 6 5/8" se requirió un peso sobre barrena de 6 toneladas.

PRUEBA DE TUBERÍA EXPANDIBLE RANURADA

Se realizó una prueba con tubería expandible ranurada, donde se limpio el cemento con una máquina de perforación de 50 toneladas y la capacidad de sellado hidráulico del revestimiento fue probada con éxito. El diámetro externo de la tubería fue de 6.375" y el diámetro del mandril utilizado fue de 8.125" y la longitud de la tubería fue de 5 metros, la tubería obtuvo un diámetro final de 10". La sección de prueba de tubería se muestra en la Figura 2.8.

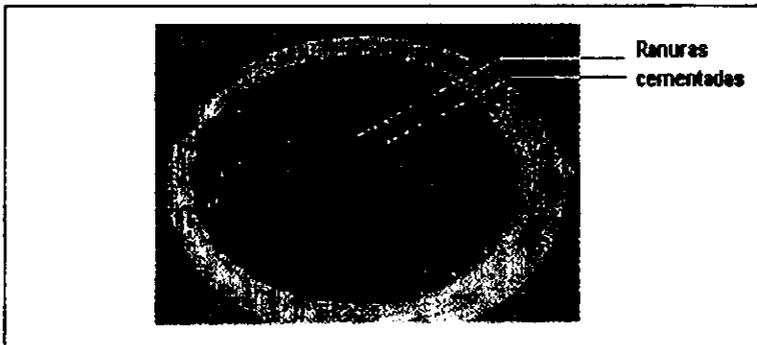


Figura 2.8 Sección limpia de tubería expandible ranurada en fibra cemento.

Se realizaron otras pruebas con tubería ranurada de 9 5/8" en zonas con relación de gas y resistieron una presión de colapso de 479 psi sin mostrar gas.

GRADO DE LA TUBERÍA

El grado de la tubería es un grado estándar patentado por la compañía que comercializa esta, y sus características dependerán de la dimensión de las ranuras y del porcentaje de expansión.

De la composición de los componentes de la tubería únicamente se pudo obtener la información de que es una aleación de acero al carbón.

2.4 TUBERÍA DE REVESTIMIENTO EXPANDIBLE SÓLIDA

La tubería sólida tiene una alta resistencia y acero dúctil, cuenta con una expansión radial del 20 al 25% del diámetro original, los procesos de expansión tensión–endurecimiento del metal guardan sus propiedades esenciales ruptura/colapso constantes.

El proceso al igual que en la tubería expandible ranurada implica introducir un mandril (Figura 2.2) y un cono interior que lubrica el dispositivo de la tubería expandible, con un menor diámetro interno que el del cono y expandiendo la tubería dentro del pozo.

El diablo viaja de la parte inferior de la sección de tubería expandible hacia la parte superior de ésta, a la inversa que en la tubería expandible ranurada.

La integridad de la tubería no se reduce, el proceso de expansión de hecho trabaja endurecidamente, de esta forma el metal es tan fuerte o más en el modo de expansión que como lo era originalmente, debido a la orientación de sus partículas.

Aunque la idea de tubería expandible puede ser simple, el proceso es complicado e implica muchos fundamentos mecánicos que no se tocaran en el presente escrito debido a la escasez de la información.

MODELOS REALIZADOS DURANTE LAS PRUEBAS

Se modelaron extensos números con códigos comerciales de elemento finito, esto fue posible para obtener resultados de experimentos concluyentes sobre la expansión de la tubería.

Los resultados de un modelo analítico fueron satisfactorios y los fundamentos de expansión tubular fueron analizados para un gran rango de parámetros. Esto hizo posible correr cuidadosamente modelos numéricos seleccionados, los resultados sobre un diseño sólido experimental ayudaron para tener éxito, ver Figura 2.9.

También se realizaron experimentos para obtener resultados experimentales concluyentes sobre la expansión desarrollada mediante análisis nodal y los fundamentos de expansión tubular fueron analizados para un amplio rango de parámetros.

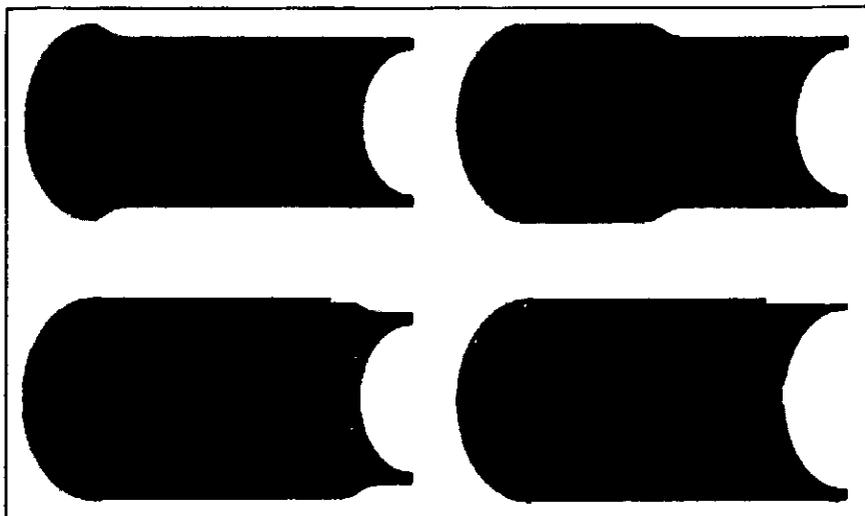


Figura 2.9 Gráfica del modelado del análisis de esfuerzo tangencial encontrado durante la expansión de tubería sólida.

Las soluciones que la tecnología ofrece son basadas en modelos analíticos, pruebas de laboratorio, y pruebas de escala real en campo usando conectores modificados y un diseño de mandril apropiado, estas pruebas tienen resultados sobre importantes avances y demuestran la factibilidad de expansión de la tecnología.

Las pruebas fueron muestreadas usando requerimiento como los del Boletín API 5C3 y Especificaciones API 5CT para su fabricación.

SISTEMAS DE PRUEBAS

Todos los diseños mecánicos finales fueron probados dentro de series de tres partes de pruebas de expansión. Las muestras de cada prueba fueron sometidas a una serie de pruebas mecánicas, las tres categorías de pruebas de expansión fueron laboratorio, superficie y fondo del pozo.

EXPERIMENTOS DE LABORATORIO

Se seleccionaron productos con costura soldada para estudios de expansión inicial porque su espesor de pared es fácilmente controlado.

Los Grados que se seleccionaron para hacer las pruebas fueron grado K-55 y L-80, los compuestos químicos de los materiales estudiados se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Composición química (% en peso) de acero expandible utilizado.

Elemento	Grado K-55	Grado L-80
C	0.36	0.23-0.27
Cr	0.07	<=0.02
Ni	0.01	<=0.02
Mo	0.13	<=0.01
Mn	1.35	0.93-1.34
Si	0.27	0.22-0.27
P	0.014	0.010-0.015
S	0.004	0.003
Ti	0.001	0.001-0.010
Nb	<0.005	<0.005
Cu	0.01	<0.02
V	0.001	<=0.048
Al	0.028	0.044-0.048

ENSAYO DE IMPACTO

Se realizó una prueba de impacto, donde los resultados de prueba después de la expansión muestran los cambios en la resistencia al impacto Charpy del mandril de tubería expandible, sin embargo, la resistencia al impacto a 32 °F, y mayores, es todavía aceptable. La Figura 2.10 representa gráficamente estos valores.

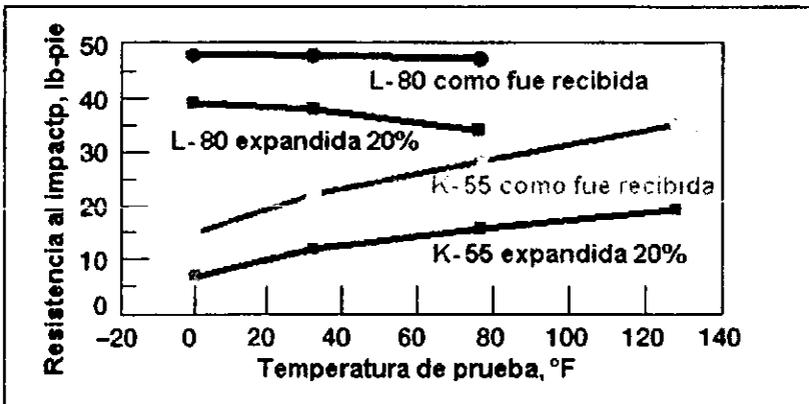


Fig. 2.10 Resultados del ensayo de impacto Charpy contra la temperatura de cuando son recibidas y expandidas las tuberías.

OTRAS PRUEBAS

Se realizaron otras pruebas de las cuales sus requerimientos fueron:

Tubería flexible 3 ½" expandió a 5", la presión que se requirió fue de 40,000 lb de fuerza mecánica para crear un 23% de expansión, la muestra fue de 1 metro de longitud. La longitud de la muestra se redujo en aproximadamente 5% y la reducción de pared de espesores fue despreciable.

Otra tubería flexible que fue expandida fue de 3 ½", requiriendo aproximadamente 5,700 psi para su expansión.

La tubería que fue analizada en los resultados anteriores de ensayo de impacto fue una tubería de 13 3/8" y se requirió aproximadamente 1,900 psi para su expansión.

GRADO DE LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO EXPANDIBLE SÓLIDA

Para esta tubería se cuenta con un número amplio de los grados y diámetro de tuberías, así como accesorios (centradores, estabilizadores) similares a los grados de los catálogos de API, garantizando con esto que la tubería se comporta como cualquier otra.

2.5 PROPIEDADES DE LAS TUBERÍAS EXPANDIBLES

El conocimiento de propiedades mecánicas después de la expansión es imprescindible para la exacta clasificación de la aplicación de productos tubulares evaluados. Después de la expansión la resistencia, ductilidad, esfuerzo de impacto, colapso y presión interna se estudiaron para seleccionar tamaños de tubería y comparar los mismos valores para el tubo cuando es recibido.

A continuación se describen las propiedades de las tuberías expandibles estudiadas a la fecha. Cabe señalar que los incisos hablan de la tubería expandible sólida y sólo en el e) se hablara de la tubería ranurada, esto es debido a la escasez de la información publicada a la fecha.

a) RESISTENCIA A LA PRESIÓN INTERNA

Se observó en las pruebas que el proceso de expansión no tiene efecto perjudicial sobre la fuerza de presión interna. La presión interna de tubería de revestimiento expandible sólida L-80 expandida se encuentra dentro de las expectativas de

formulas generales, y la superficie fracturada de todas las pruebas ejemplo mostraron comportamiento dúctil de fractura, verificando con esto que no existe riesgo al aplicar esta tubería, ya que se comporta esta tubería de forma similar a las tuberías API.

b) RESISTENCIA A LA TENSIÓN

Los resultados de las propiedades mecánicas en pruebas para 5 ½", 17 lb/pie, grado L-80 de tubería son resumidos en la Tabla 2.2. Los resultados muestran que el proceso de expansión en realidad afecta las propiedades mecánicas del material, pero al final se obtienen las características adecuadas para esta tubería.

Con la expansión la fuerza final de tensión tiende a incrementarse, y el porcentaje de elongación tiende a decrementarse. Con esto se comprueban los resultados aceptables del trabajo en frío del material.

Las pruebas mostraron que las dificultades experimentales asociadas con esfuerzo residual en la tubería expandida puede causar un alto grado de variabilidad en datos de prueba de fuerza de ruptura o esfuerzo de cedencia.

Las propiedades de dureza y tensión de la tubería probada L-80 son variados después de la expansión; sin embargo, la tubería todavía encontró requerimientos adecuados después del 20% de la expansión. Se obtuvieron resultados similares con grado K-55, como se muestra por los datos de la Tabla 2.3.

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas de TR grado L-80.

Propiedad	Especificaciones API 5CT Requeridas p/Grado L-80 Tipo 1	L-80 sin expansión	L-80 20% expansión
Dureza (Brinell)	241 máxima	200-205	217
Esfuerzo de cedencia (ksi) a 0.5% de extensión total	80 mínimo	82.3	82.4
Esfuerzo Final de tensión	95 mínimo	96.9	104.8
Elongación (%)	14 mínima	27.1	19.4

Formula de % de elongación tomada de Especificaciones API 5CT.

Tabla 2.3 Propiedades mecánicas de TR Grado K-55.

Propiedad	Especificaciones API 5CT requeridas p/Grado K-55	K-55 sin expansión	K-55 20% expansión
Esfuerzo de cedencia (ksi) a 0.5 % de extensión total	55-80	70.2	79.4
Último esfuerzo de cedencia	95 mínimo	110.5	116.0
Elongación (%)	9.5 mínima	26	22

c) RESISTENCIA AL COLAPSO

Los datos de prueba en tubería 5 1/2", 17 lb/pie, Grado L-80 muestran que la resistencia al colapso después de la expansión estuvo cerca o ligeramente abajo del mínimo requerido por el Boletín API-5C3.

Afortunadamente, los estudios han mostrado que características significativas porción de los materiales, con resistencia inicial al colapso pueden ser recuperadas in situ a través de un proceso especial desarrollado. Un ejemplo es que la aplicación de este proceso para tubería de revestimiento L-80 expandida 20% resultó en un incremento del 48% de resistencia al colapso después de la expansión. Aun se continúa investigando para comprender este efecto el cual llevará a mejorar cálculos, bajo condiciones del fondo del pozo y refinar métodos para remediación (recuperación) in situ de la fuerza de colapso.

Datos de la prueba de tubería Grado L-80 indicaron que si las dimensiones antes y después de la expansión son las mismas, la resistencia a la presión de colapso disminuye en un 30% después de la expansión, como resultado del proceso de expansión, la relación se puede expresar por la siguiente ecuación.

$$P_{C2} = 0.7 P_{C1} \quad \text{Así, } P_{C1} > P_{C2}.$$

La presión de colapso 2 es semejante a la de las tuberías API, es decir, la presión de colapso 1 es mayor a la de la tubería API y al ser expandida será semejante a las especificaciones requeridas.

d) RESISTENCIA A LA CORROSIÓN POR SULFHÍDRICO.

Para la tubería de revestimiento sólida expandible se llevó a cabo la prueba de NACE TMO177.

De las tuberías de revestimiento expandibles sólidas grado L-80 con un 10% y 20% de expansión, se muestrearon 4 puntos ejemplares de estas por el método de Viga doblada de NACE TMO177.

Las muestras fueron forzadas (fatigadas) al 100% de su medida de fuerza de ruptura (cedencia) y expuestas a solución.

Esta prueba se realizó a temperatura ambiente (24°C) con una cubierta (tapa) de gas de 15 psi de H₂S, bajo una solución acuosa de NaCl acidificada al 5% de su peso y con un pH de 2.8.

Ninguno de los ejemplares fue corroído al cumplirse las 720 horas de expuesta la muestras que es lo que dura la prueba.

La prueba evalúa una resistencia del material para esfuerzo de corrosión por sulfhídrico. Debido a ello y al resultado satisfactorio de la muestra se indicó que esa tubería L-80 es conveniente para servicio amargo.

e) PROPIEDADES DE LAS TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO EXPANDIBLE RANURADAS

La tubería de revestimiento con fibra cemento hasta hoy es diseñada para soportar 1,000 psi de diferencial de presión entre la tubería y la formación, en ambas direcciones, y que sea suficientemente fuerte para mantener esta capacidad mientras se perfora a formaciones más profundas, a medida que pase el tiempo se espera diferentes diseños y características de esta tubería.

Las tuberías de revestimiento expandibles ranuradas tienen diferentes propiedades que una tubería convencional y que una tubería expandible sólida.

No existe información de las propiedades, así como tampoco hay un símil para poder hacer la comparación, debido a ello es todo lo que se puede mencionar al respecto.

VENTAJA DE LA TUBERÍA EXPANDIBLE SÓLIDA vs LA TUBERÍA EXPANDIBLE RANURADA

La ventaja de la tubería de revestimiento expandible sólida, comparada con la tubería de revestimiento expandible ranurada, es que la presión que soporta la tubería es independiente del cemento.

Es posible correr secciones muy largas de tubería expandible sólida sin que al final se tenga que correr una tubería desde la superficie, y en el caso de la tubería expandible ranurada no se puede hacer esto y se tiene forzosamente que correr al final una tubería desde la superficie.

Por otro lado, los sistemas ranurados son mucho más simples, porque la expansión de este tipo requiere solo cerca de un treintavo de la fuerza necesaria para agrandar la tubería sólida.

Otra ventaja es que en las tuberías sólidas se pueden utilizar los grados y diámetros de las tuberías análogos a los que se encuentran dentro de los catálogos API, y en las tuberías ranuradas únicamente se tiene un grado estándar

para las operaciones, que variará dependiendo de las ranuras y el porcentaje de expansión.

SERVICIOS DE LAS TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO EXPANDIBLES

Existen diversos servicios para las tuberías de revestimiento expandibles, a continuación solo se mencionará uno de ellos.

MODELACIÓN DEL PROCESO DE TUBERÍA DE REVESTIMIENTO EXPANDIBLE.

Las aplicaciones para la tubería de revestimiento expandible podrán ser modeladas en una computadora usando el método del elemento finito (ABAQUS), (Figura 2.11).

Cuando se utiliza este modelo, se puede predecir el proceso completo de expansión, esto permite las condiciones ideales a ser generadas en una particular aplicación. Este modelo puede proporcionar información tal como:

- ✓ Especificación y diseño del material de la tubería.
- ✓ Fuerza requerida para la expansión.
- ✓ Esfuerzo residual en la tubería expandida.
- ✓ Propiedades pronosticadas iniciales de la tubería expandida.
- ✓ Valoración de la vida de la tubería expandida.
- ✓ Diseño del diablo y herramientas.

Es difícil comprender las propiedades de la tubería expandible. Este modelo puede ser utilizado para ser mostrado a organismos legislativos como el H.S.E. en el Reino Unido y a PEMEX en México, y así tener la completa seguridad de que la tubería no fallará y que tendrá las especificaciones deseadas.

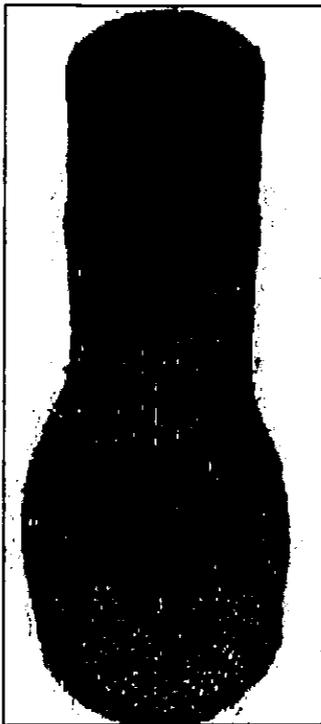


Figura 2.11 Modelo de tubería expandible modelada con elementos finitos (ABAQUS).

3. APLICACIÓN DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO EXPANDIBLES

Se describirán las tuberías de revestimiento expandibles, así como algunas aplicaciones de esta tecnología en el mundo.

La tecnología de tubería expandible tanto la sólida como la ranurada tiene varias aplicaciones, dependiendo de los diversos problemas que se presentan durante la perforación, terminación o reparación de pozos.

Dado que la tecnología que más requiere del uso de tuberías expandibles es la de aguas profundas (esto debido a que en este tipo de aguas se han encontrado grandes yacimientos), es aquí donde se encaminan los principales esfuerzos de investigación y desarrollo.

El rumbo de estas investigaciones está encaminado a la conservación del agujero, debido a que el punto crítico aquí es que existe una alta presión hidrostática al inicio de la perforación, en el fondo marino y aumenta progresivamente debajo de este.

Actualmente se desarrollan nuevas técnicas para trabajos en ambientes severos como en este caso la tecnología de tubería expandible, a fin de proporcionar seguridad en las operaciones, ya que si se utiliza satisfactoriamente puede evitar problemas tales como pérdida total del pozo, descontrol, entre otros. Con todo esto se observa que gran parte de la tecnología que se desarrolla se centra inicialmente en operaciones marinas, pero a futuro se espera que esta tecnología traiga beneficios en operaciones en tierra.

La tubería de revestimiento resuelve muchos de los retos de perforación de pozos, como en el caso de los yacimientos en aguas profundas y ultra profundas porque al utilizar tecnología expandible se elimina una o dos sargas dependiendo del diseño y terminando pozos con un mayor diámetro y si inicialmente se comienza con un diámetro menor utilizando tubería expandible se llegará a un diámetro final convencional.

Como se mencionó anteriormente esta tubería se divide en tubería sólida y ranurada, teniendo cada una diferentes sistemas, características y utilidades. Para comprender mejor a las tuberías de revestimiento expandibles se mencionarán cada uno de los sistemas.

3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TUBERÍA EXPANDIBLE RANURADA

La tubería de revestimiento expandible ranurada se puede clasificar, por su aplicación, en tres sistemas, los cuales son:

- ✓ Sistema de tubería de revestimiento corta expandible alternativa (*Alternative Borehole Liner System, ABL*).
- ✓ Sistema de tubería de revestimiento corta expandible para terminación (*Expandable Completion Liner System, ECL*).
- ✓ Sistema ranurado de malla expandible para control de arena (*Expandable Slotted Screen System, ESS*).

3.1.1 SISTEMA DE TUBERÍA DE REVESTIMIENTO CORTA EXPANDIBLE ALTERNATIVA (ABL)

El sistema ABL es una tecnología de construcción de agujero que permite la selección de la zona de aislamiento de la sección problema en pozos erosionados, de tal manera que con este sistema se permite restaurar el diámetro inicial del pozo.

A diferencia de una tubería de revestimiento convencional, el sistema ABL se usa únicamente para aislar el área problema específica y no toda la sección posterior, ya que debido a sus características no podría contener toda una sección del agujero.

Utilizando esta herramienta el ahorro económico está dentro del 10%, mediante la eliminación de tuberías de revestimiento de contingencia que en algunas instancias puede significar el abandono del pozo.

Es aplicable en pozos convencionales e ideal en pozos perforados con tecnología de diámetro reducido.

El Sistema ABL es un tubo ranurado que pasa a través de la tubería de revestimiento previa y es expandida mediante un mandril a fin de proporcionar el mismo diámetro de trabajo (drift), manteniendo de ese modo el tamaño de agujero. Utiliza cemento llamado fibra cemento o fibra para alcanzar una alta

resistencia y hermeticidad, esta fibra cemento envolvente proporciona el sello alrededor del sistema ABL donde se desea aplicar.

Este sistema es el único sistema de tubería de revestimiento expandible que puede aislar secciones de agujeros perforados sin pérdida de tamaño del mismo ya que es colocado en una sección ampliada.

Cuando no se cuenta con presión, tal como en zonas de derrumbes o zonas de lutitas hinchables la sección que se desea aislar se puede perforar con barrenas excéntricas o bicéntricas. Este tipo de barrenas agranda el agujero en el cual el sistema de liner alternativo expandible se colocará y de este modo se mantendrá el tamaño original del agujero.

Si se planea un diseño adecuado con este sistema se reduce el telescopiado en los pozos, debido a que se utilizarán menos sargas desde la superficie, esto es en el caso de que la tubería cubra satisfactoriamente la zona problema.

El sistema se divide en cuatro componentes los cuales son: herramienta corrediza o mandril, conector expandible superior, juntas ABL y conector expandible de fondo, los cuales se describen a continuación.

a) HERRAMIENTA CORREDIZA O MANDRIL. Esta herramienta aloja el cono de expansión. La parte del fondo contiene el diablo (que genera un desplazamiento cortante) que es el medio para que el conector superior realice la expansión desde arriba (Figura 3.1).

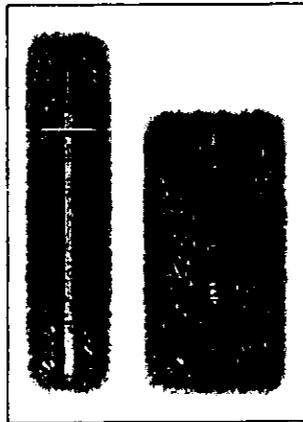


Figura 3.1 Herramienta corrediza.

b) CONECTOR SUPERIOR EXPANDIBLE. Es la interfase entre la herramienta corrediza (o mandril) y la sarta ABL y contiene la localización para el perno de seguridad (Figura 3.2).

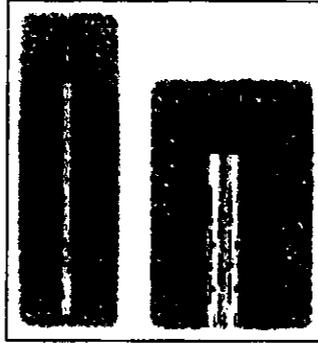


Figura 3.2 Conector expandible superior.

c) JUNTAS ABL. Estas juntas son suministradas comúnmente en 12 metros de longitud y la junta superior se puede adquirir de diferente longitud. Todas las juntas son revestidas con un poliuretano sellador que permite la circulación, esto es para que el fluido interior no se contamine por la formación (Figura 3.3).

La unión de las juntas se lleva a cabo por medio de unos tornillos que se colocan después de haberse embonado estas. Estos tornillos se colocan en unas aberturas alargadas especiales para ellos y no existirá problema cuando se expanda la tubería, ya que se desplazan en las aberturas, comúnmente se utilizan de 4 a 8 tornillos.

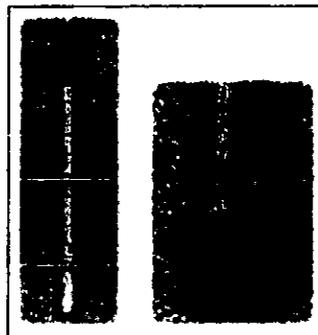


Figura 3.3 Juntas ABL.

d) **CONECTOR DE FONDO EXPANDIBLE.** Es la interfase entre la zapata y la sarta ABL, ver Figura 3.4. Esta zapata la forma una parte del diablo, que es desprendida al recuperar el dispositivo en la superficie (Figura 3.9).

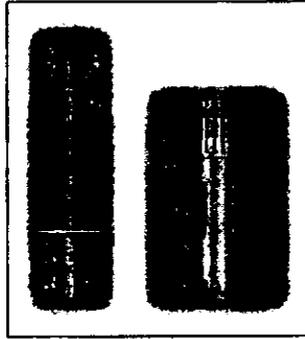


Figura 3.4 Conector expandible de fondo.

DESPLAZAMIENTO

El desplazamiento del Sistema ABL es muy simple, se requiere únicamente una corrida para la instalación, cementación y expansión. Para entender mejor el desplazamiento de la tubería expandible ranurada se puede visualizar en la Figura 3.5, ya que es la manera en que son corridos los tres sistemas de esta.

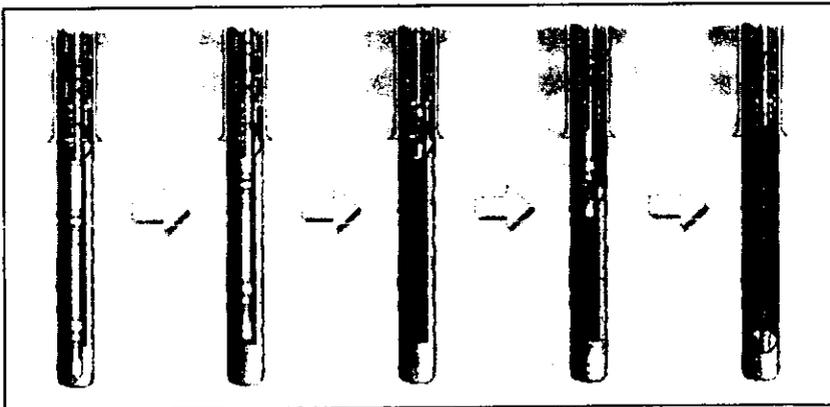


Figura 3.5 Secuencia del proceso del sistema ABL.

A continuación se muestran los pasos del desplazamiento.

1. Se coloca la tubería de revestimiento convencional (la anterior a la del sistema ABL).
2. Se perfora una nueva zona y se amplía si es necesario para que pueda introducirse sin ningún problema el sistema ABL.
3. Se corre un registro de calibración sónico para verificar la geometría del agujero.
4. Se arma la sarta del sistema ABL en la superficie.
5. Se introduce la sarta a la profundidad total, quedando esta en la parte ampliada, ver Figura 3.6.

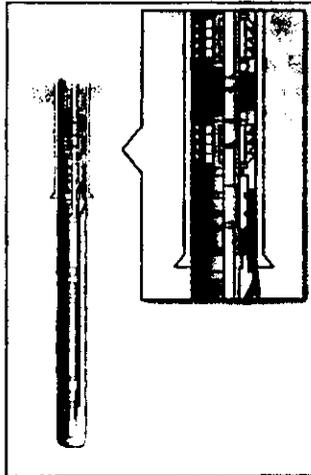


Figura 3.6 Esquema de herramienta corrediza y sarta de trabajo introducidos hasta la profundidad deseada.

6. Se bombea el cemento y posteriormente se quiebra el perno de seguridad cargándole peso (estando el cemento sobre el perno de seguridad), como lo muestra la Figura 3.7.

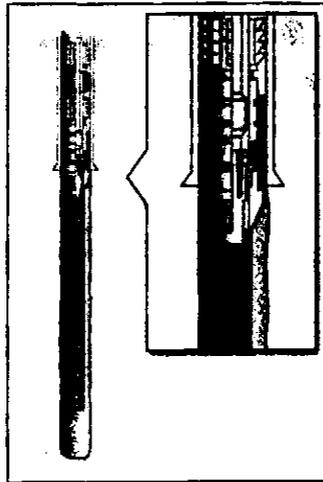


Figura 3.7 Esquema de sarta de trabajo liberando herramienta.

7. Se inicia el desplazamiento del diablo antes de que fragüe el cemento, este proceso de expansión es debido a que la fuerza descendente se convierte en esfuerzo cortante (Figura 3.8).

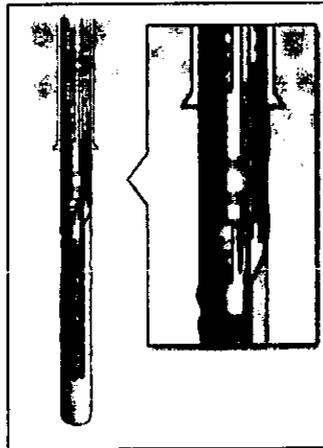


Figura 3.8 Esquema mostrando el inicio del proceso de expansión.

8. Se alza el diablo hasta la parte superior del sistema y el exceso de cemento se bombea a la superficie.
9. Cuando termina la expansión, la sarta de trabajo es recuperada en superficie, dejando un cono de expansión o zapata en el fondo del pozo (en la base de la tubería, este es de aluminio, siendo este después molido (Figura 3.9). La zapata es fabricada de aluminio y es molida en aproximadamente 30 minutos.

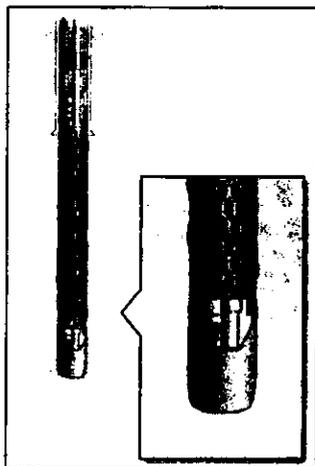


Figura 3.9 Esquema mostrando expansión terminada.

10. Se espera a que fragüe el cemento y se baja un molino para quitar el cemento en el interior del sistema ABL.

VENTAJAS

Este sistema cuenta con algunas ventajas tales como:

a) INSTALACIÓN

Reduce los costos de instalación debido a que se puede eliminar una sarta en alguna zona donde se requiera aislar la formación.

Evita accidentes mecánicos porque se mantiene un diámetro mayor de trabajo, y se tendrá mayor espacio para maniobrar.

b) PRODUCCIÓN

Se podrá admitir mayores conductos de producción que con las tuberías convencionales. Debido a mayores conductos, se podrá tener un incremento en la producción, debido a que se podrá instalar una sarta de producción sin tantas restricciones en el agujero, también porque se puede mantener un diámetro mayor y se puede alcanzar al yacimiento fácilmente con mayores diámetros en accesorios para terminaciones, sin tener que utilizar herramientas diseñadas para agujeros esbeltos.

APLICACIONES

Las aplicaciones que se han reportado a la fecha con esta tubería son para:

- ✓ Aislar zonas problema, en el caso de:
 - Arcilla hinchada.
 - Derrumbes de lutitas.
 - Zonas de pérdida de fluido.
 - Zonas de alta y baja presión.

En el caso de pérdida de fluido en la Zona Marina se tiene la Brecha del Paleoceno donde existe pérdida total de fluido, aquí es precisamente la correcta aplicación de esta tecnología y es donde se debe poner mayor empeño para no pasarla por alto.

- ✓ Se utiliza como sarta de contingencia sin pérdida de tamaño de agujero.

No se tendrá que sacrificar una sarta para aislar una zona problema o al tener algún tipo de contingencia, ya que como se mencionó anteriormente, con este sistema no existe pérdida en el diámetro y posteriormente se podrá seguir perforando sin alterar el diseño del pozo y alcanzar con éxito el objetivo planeado.

La Región Marina de Pemex tiene contemplado diseñar a futuro algunos pozos con este sistema, ya que les ayudará a resolver muchos problemas de perforación, un ejemplo más representativo se tocará el en Capítulo 4, donde se hace la comparación de los problemas que se pudieron haber evitado en un pozo en la Región Marina si se hubiera utilizado un sistema ABL.

3.1.2 SISTEMA DE TUBERÍA DE REVESTIMIENTO CORTA EXPANDIBLE PARA TERMINACIÓN (ECL)

Este sistema únicamente es para terminaciones y sustituye a tuberías cortas que son disparadas después en pozos horizontales y cedazos.

Este sistema mantiene a los pozos horizontales con sus dimensiones, evitando con ello derrumbes ocasionados por la geometría o el colapsamiento del agujero contra la tubería o cedazo, con ello el sistema evita la existencia de espacio anular entre la tubería corta o el cedazo y la formación, ya que la tubería será expandida de manera que se elimine este espacio anular.

El sistema ECL se expande de la misma manera que el sistema ABL la diferencia es que este no es cementado, con el fin de que por las ranuras fluya el aceite del yacimiento, evitando posteriores disparos.

Los componentes de este sistema son los mismos que los del sistema ABL, solo que las juntas son juntas ECL, variando en su resistencia pero la forma de esta es la misma, también el tamaño de las ranuras depende del diseño. Se puede decir con esto que el sistema ECL es un subsistema del sistema ABL, ya que la forma, el desplazamiento y las ranuras son similares y únicamente dependerán del diseño.

VENTAJAS

Entre las ventajas con las que cuenta el sistema se mencionan:

- ✓ Mejora la administración del yacimiento, teniendo un diámetro mayor y toda la sección ranurada, permitiendo mayor flujo.
- ✓ Estabiliza la formación, debido a que no existe espacio anular evitando derrumbes.
- ✓ Se mejoran los datos de registros de producción y administración de yacimientos permitiendo una recuperación estimada adicional del 10%.
- ✓ Se reducen costos de instalación debido a que se requiere menor superficie de tubería de revestimiento resultando ahorros de costo de pozo del 20%, si este sistema es planeado desde que se diseña el pozo.
- ✓ Se instala el sistema ECL a menor costo que el liner cementado, evitando los disparos y protegiendo a la formación.

- ✓ Se reducen los costos de operación, ya que se tendrá mejor acceso, operación y reparación.

APLICACIÓN

Este sistema es muy útil en pozos horizontales para evitar que se derrumbe el área descubierta, ya que evita la necesidad de utilizar una tubería corta y dispararla, evitando daño a la formación.

La aplicación de este sistema en pozos verticales sería innecesaria si la formación estuviera consolidada, pero si no fuera así se tendría que realizar un estudio de factibilidad para ver si se aplica o no. Sin embargo las aplicaciones a este dispositivo van enfocadas a pozos horizontales ya que el costo es mayor.

La aplicación de este sistema en pozos ramificados sería de gran ayuda, ya que no dañaría la formación, y si se tuviera cerca un casquete de gas se evita el posible riesgo de alcanzarlo con los disparos, evitando manifestarse directamente en la superficie.

En la Región Norte se podría aplicar, ya que en esta región es donde se tiene el mayor número de pozos horizontales, desviados y con reentradas.

En la Figura 3.10 se compara a la tecnología convencional y el sistema ECL, con el fin de que se visualice mejor la tecnología.

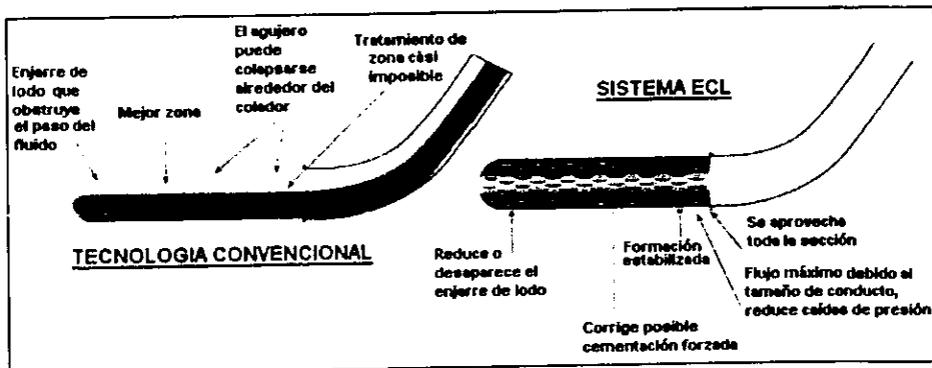


Figura 3.10 Comparación de la tecnología convencional y el sistema ECL.

3.1.3 SISTEMA RANURADO DE MALLA EXPANDIBLE PARA CONTROL DE ARENA

Este sistema sirve para control de arena y ofrece beneficios comparado con el cedazo y el empacamiento con grava. Así también este sistema puede instalarse con la tubería de producción o la tubería de perforación.

Al igual que el sistema de tubería corta expandible para terminación, el sistema elimina el espacio anular formado alrededor del tubo pero este lleva una membrana que sirve para colar el aceite.

Para instalar el tamaño adecuado de criba de la maya se toman en cuenta todas las características de producción.

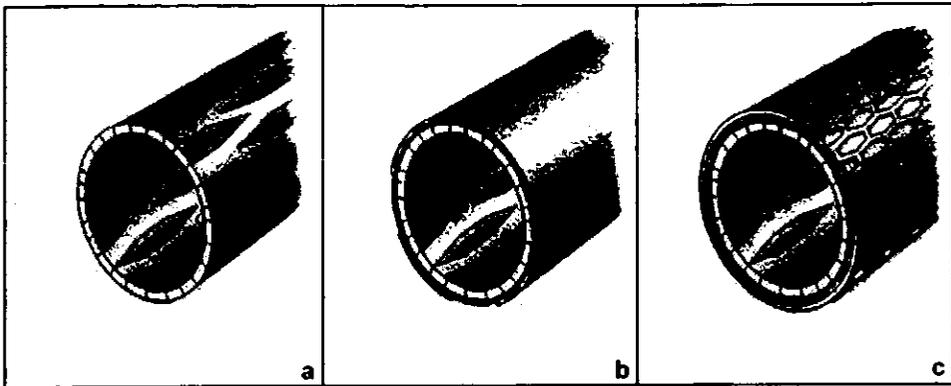
La instalación de este sistema es más rápida que en los empacamientos con grava.

La ventaja principal es el diámetro que se puede adquirir será igual o menor al de la tubería anterior. Con esto se obtiene eficiente administración del yacimiento y se mejora la recuperación a través del diámetro interno.

En el caso de formaciones no consolidadas el agujero se puede comenzar a colapsar cuando se utiliza un colador convencional y este proceso permite la movilización de partículas finas de la formación y contribuye al taponamiento prematuro de arena. Esto se evita con el sistema de colador expandible.

El sistema consiste de 3 capas componentes como lo muestra la Figura 3.11, estas son:

- a) Base del tubo expandible ranurado.
- b) Membrana de filtración traslapada en la base del tubo revistiendo a este.
- c) Casquillo protector exterior expandible.



3.11 Componentes de las capas del sistema ESS.

PROCEDIMIENTO DE LA EXPANSIÓN

Para expandir la tubería se introduce a la profundidad deseada y se desplaza el diablo como en el sistema ABL, a diferencia de que no se usa la fibra cemento.

Durante el proceso de expansión la membrana filtro se acomoda en la base expandida por deslizamiento de una capa sobre otra, hasta alcanzar el diámetro final, quedando finalmente intercalada entre las otras dos capas (Figura 3.12).

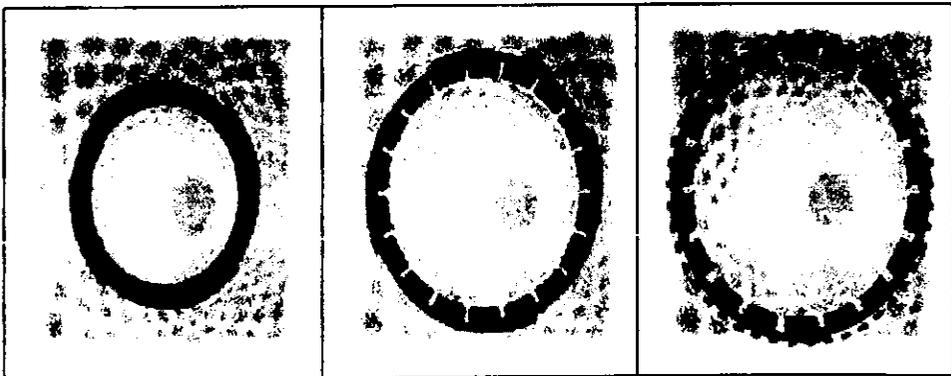


Figura 3.12 Intercalación de las capas del sistema ESS cuando el proceso de expansión es alcanzado.

APLICACIONES

Se encuentran diversas aplicaciones y beneficios debido a la eliminación del espacio anular, comparados con los coladores tradicionales y empacamientos con grava.

La aplicación principal, es en donde se tienen zonas productivas intermedias y únicamente una de ellas requiere control de arena.

Se podría pensar en aplicar este sistema en pozos con alto índice de producción de arena, como en el caso de la Región Sur.

REDUCCIÓN DE LA EROSIÓN

Al aplicar este sistema el comportamiento de carga grano-arena varía debido a que el movimiento de partículas y reorganización son minimizados, lo que reduce el desmoronamiento de la formación y el ataque de pequeños movimientos hacia el pozo, reduciendo la tendencia del taponamiento (Figura 3.13).



Figura 3.13 Esquema mostrando la reducción del desmoronamiento de la formación.

Por otro lado, cuando se tiene el sistema ESS con espacio anular, las partículas que dejan la cara de la formación no pueden afectar la superficie del colador. Estos efectos de erosión regulan la producción (Figura 3.14).



Figura 3.14 Esquema de tubería con pequeño espacio anular.

PRODUCTIVIDAD MEJORADA

A diferencia de un convencional cedazo, el sistema de malla expandible tiene el área máxima circunferencial y sin áreas ciegas (debido a derrumbes), proporcionando una efectiva área de afluencia (Figura 3.15).

El diámetro interno óptimo, reduce efectos de fricción (entre el fluido y la tubería ascendente) y distribuye al flujo uniformemente.

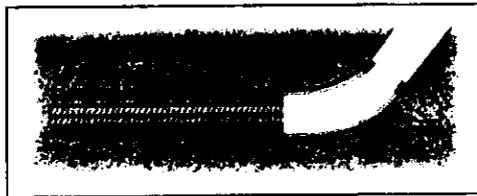


Figura 3.15 Sistema ESS colocado dentro de un agujero descubierto.

TRATAMIENTO ZONAL Y AISLACIÓN

Con el uso del sistema ESS se puede realizar tratamiento zonal, estimulación selectiva y aislamiento convencional, incrementando opciones de administración de agujero. También se perfeccionan accesos a través de agujeros como en el caso de pozos ramificados (Figura 3.16).

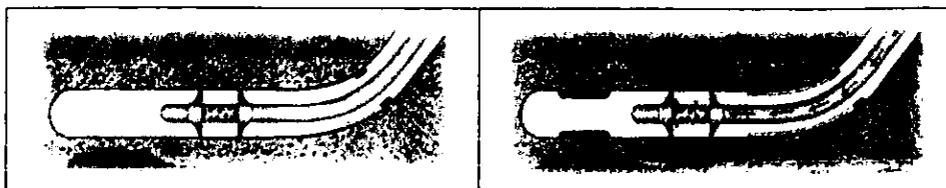


Figura 3.16 ESS colocada para tratamiento zonal y aislamiento.

Se pueden lograr más opciones con reparaciones para remediar pozos que se encuentran con una producción menor a la de cuando se instaló el sistema ESS, tal como instalar una segunda capa de ESS que podría ser corrida en la vida tardía de campos, sin significantes arreglos de diámetros internos, es decir, cuando la producción disminuya y se tenga menos presión, se podrá sacar el sistema ESS viejo e instalar un nuevo sistema ESS con nuevas características para manejar la producción actual.

COMPARACIÓN DEL EMPACAMIENTO INTERNO vs SISTEMA RANURADO DE MALLA EXPANDIBLE

Cuando se aplica un sistema ESS se obtienen substanciales ahorros en perforación debido al adelgazamiento en el perfil del agujero (desde la superficie hasta el fondo) aunque se siga manteniendo el tamaño del agujero de producción crítica, es decir, se iniciará con un menor diámetro y se obtendrán resultados similares utilizando el sistema ESS.

Otro punto es que el sistema ESS tiene su radio efectivo mayor que un empacamiento con grava, ya que no se requiere del espacio anular para alojar el empacamiento de grava, y cuando se realiza una terminación de empacamiento con grava la producción sufre mayor declinación. En este caso la productividad es más alta debido a que se elimina la caída de presión ocasionada cuando pasa el fluido a través del empacamiento.

También, se evita reducir la permeabilidad debido a migración de escombros cuando se perfora, como en el caso de perforar formaciones finas. Esto desaparece con el sistema ESS debido a que no existe espacio anular.

Como ejemplo de aplicación se tiene un convencional empacamiento con grava en tubería de revestimiento de 9 5/8" para dar un agujero de 5" y alternativamente se puede planear el diseño con un colador expandible con tubería de revestimiento de 7" y daría el mismo agujero con diámetro de 5" (Figura 3.17).

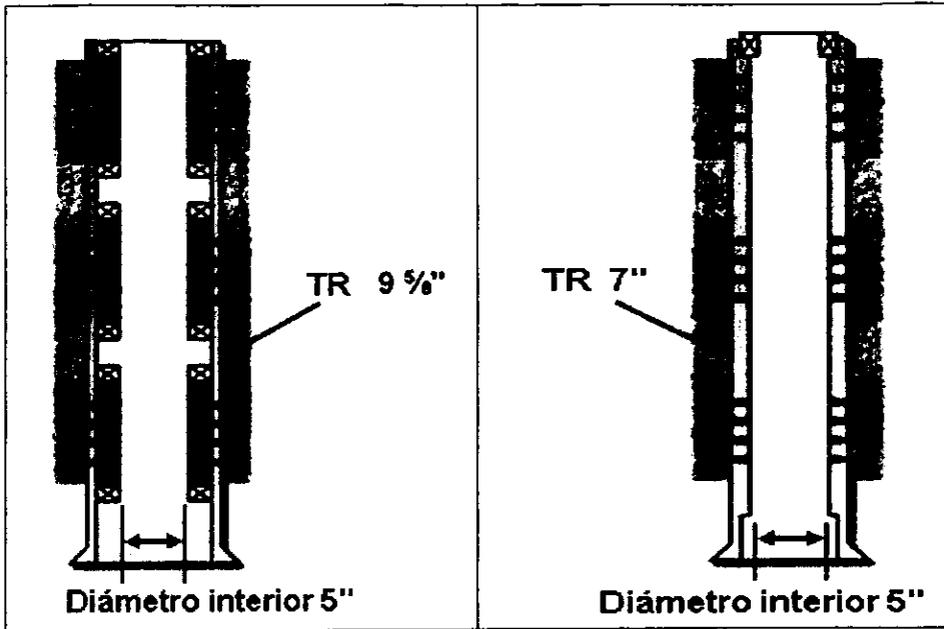


Figura 3.17 Empacamiento interno y sistema ESS.

3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TUBERÍA EXPANDIBLE SÓLIDA

La tubería de revestimiento sólida expandible se divide en tres sistemas:

- ✓ Sistema de tubería corta de perforación expandible para agujero descubierto (*Expandable Openhole Drill Liner System, EODL*)
- ✓ Sistema de tubería corta expandible para agujero revestido (*Expandable Cased Hole Liner System, ECHL*)
- ✓ Sistema colgador expandible de tubería corta (*Expandable Liner Hanger System, ELH*)

Al hacer la comparación con el sistema convencional y la tubería sólida expandible, se puede visualizar a simple vista la ventaja que existe entre los dos tipos de tubería (Figura 3.18).

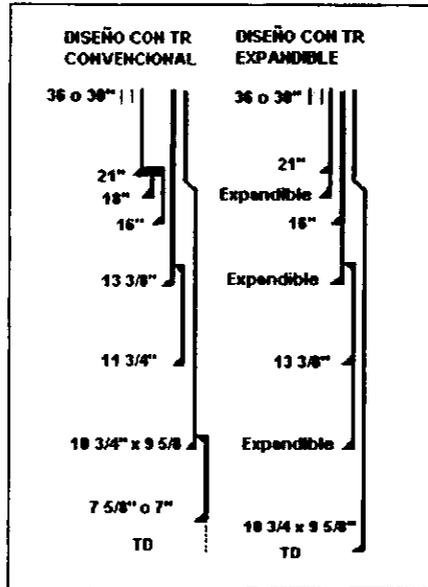


Figura 3.18 Comparación esquemática de un diseño convencional y un diseño con tubería de revestimiento expandible.

Los componentes de los tres sistemas expandibles son el mandril o diablo, la zapata de acoplamiento, el tubo expandible, las conexiones (uniones) expandibles, los componentes expandibles de la configuración sarta de trabajo, y el elastómero. También incluido en este sistema está el sistema del diablo de lubricación. Como se puede apreciar son diferentes estos componentes a los de la tubería expandible ranurada.

Cuando se hable de tubería base se referirá a la tubería en la cual quedará alojada la tubería expandible sólida y por ende el traslape, y a diferencia de la tubería expandible ranurada solo se podrá introducir un solo sistema dentro de una tubería base.

Es importante cada componente, así como la interacción de cada componente con otro para que se obtengan buenos resultados y no poner en peligro la vida del pozo o del personal.

A continuación se describirá cada componente para poder entender mejor los sistemas de la tubería expandible sólida.

a) EL ELASTÓMERO

El elastómero es utilizado en los tres sistemas de tubería sólida expandible este es un recubrimiento que va sobre la tubería y es formado de un polímero, que muestra gran deformación plástica cuando se le aplica una fuerza.

El tipo de polímeros de los cuales es formado el elastómero son inertes, es decir, no reaccionan con algún elemento y no les afecta la corrosión ni el ácido sulfhídrico, tampoco la temperatura ya que llegan a vulcanizarse a elevadas temperaturas y para que esto suceda se tendrían que introducir átomos de azufre.

Cuando el diablo es bombeado a través del tubo expandible, el tubo está completamente circular porque adopta la forma del diablo. Sin embargo, la anterior sarta pocas veces es cilíndrica; por lo tanto, se crean vacíos entre las tuberías que deben ser llenados de este modo para que el sello hidráulico pueda ser creado.

Los propósitos del elastómero son dos. Primero el elastómero ocupa el vacío (hueco) causado debido a problemas de ovalidad o desgaste de perforación y segundo, mejora la integridad hidráulica y mecánica.

El elastómero en el sistema de tubería corta expandible para agujero revestido a diferencia de los sistemas EODL y ELH cubre todo el intervalo para facilitar la integridad hidráulica del liner. En promedio, este sello puede soportar 18,750 *lb/pg²* de tubo revestido.

La Figura 3.19 muestra una tubería corta expandible para agujero revestido dentro de un diámetro mayor de tubería de revestimiento reforzando la tubería original, en esta operación se utilizó un elastómero.

La Figura 3.20 muestra dentro de una tubería de revestimiento un liner expandible para agujero revestido, las tuberías no tienen sello de elastómero, debido a ello se encontró una resistencia mecánica reducida al sacar la tubería y un pobre sello hidráulico entre las dos tuberías, la resistencia mecánica fue disminuida de 18,750 *lb/pg²* hasta aproximadamente 1,083 *lb/pg²*, de ahí la importancia del uso del elastómero.



Figura 3.19 Tubería con elastómero.

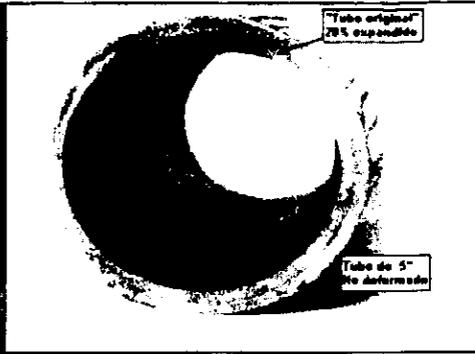


Figura 3.20 Tubería sin elastómero.

b) CANASTILLA O DIABLO LANZADOR

Este dispositivo contiene en su interior al diablo y se encuentra al fondo del sistema. Es construido con acero de gran dureza. El diámetro de la canastilla es más delgado que el diámetro de la tubería de revestimiento base, esto es para poder viajar fácilmente a través de esta.

El diablo lanzador es molido al terminar la operación de expansión ya que como queda al fondo del pozo no podría ser recuperado.

El diablo lanzador tiene una longitud de 1 a 2 metros, dependiendo del diablo de montaje (diablo de expansión), ya que tendría que soportar a este.

c) CÁMARA DE PRESIÓN

La cámara de presión es formada en el proceso entre el diablo lanzador o canasta y el diablo debido a la presión hidráulica haciéndose de mayor longitud a medida que el diablo se desplaza expandiendo la tubería.

En esta cámara de presión cuando se forma suficiente presión es cuando el diablo comienza a desplazarse, homogéneamente y evitando que se desvíe.

d) CEMENTACIÓN

La cementación es llevada a cabo únicamente en el sistema de tubería corta de perforación expandible para agujero descubierto (EODL) y sistema colgador expandible de tubería corta (ELH). El sistema tubería corta expandible para

agujero revestido (ECHL) no requiere cemento ya que es traslapado completamente en la tubería base.

Al igual que la tubería ranurada, la tubería sólida tendrá que ser expandida antes de que fragüe el cemento. La lechada de cemento será preparada para permitir tiempos mayores de fraguado, ya que como se dijo anteriormente el cemento deberá quedar líquido durante el proceso de expansión, la diferencia de esta lechada y la lechada de la tubería expandible ranurada es que esta no es fibra cemento debido a que es sólida y tiene mayor consistencia.

Se tienen que mantener las propiedades de resistencia del cemento en las zonas de mayor interés que se deseen aislar, verificando con algún registro la cementación y así asegurar el éxito de la operación.

LONGITUD DE LA CORRIDA

Actualmente se han desarrollado sistemas para expandir de 150 a 300 metros en una corrida, estos se podrán fabricar de mayor longitud a medida que la tecnología siga avanzando, así se mejorarán sus características y los tiempos de las operaciones podrían disminuir ya que se tendría un mayor control de la tecnología.

3.2.1 SISTEMA DE TUBERÍA CORTA DE PERFORACIÓN EXPANDIBLE PARA AGUJERO DESCUBIERTO

Este sistema como su nombre lo dice es utilizado para agujeros descubiertos, ayudando en el ahorro de costos, esto se aprecia en la Figura 3.18, ya que el número de sargas se reduce intercalando el liner con la tubería de revestimiento convencional.

El sistema proporciona las ventajas de un liner convencional, solo que un porcentaje muy pequeño de ese diámetro se reduce debido al traslape de las dos tuberías, introduciendo solo un sistema dentro de la tubería base. La longitud del traslape dependerá del diseño.

PROCEDIMIENTO

Para entender mejor el desplazamiento del sistema de tubería corta de perforación expandible para agujero descubierto se puede visualizar la Figura 3.21.

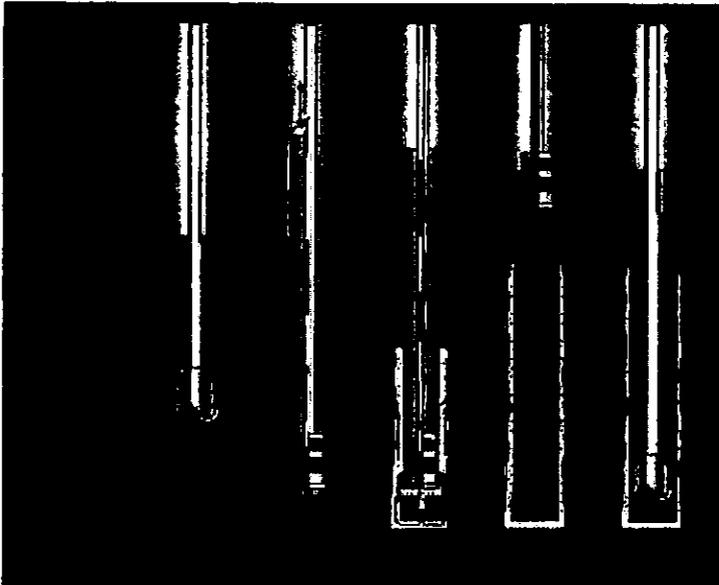


Figura 3.21 Secuencia de la corrida de un sistema de tubería corta expandible de perforación para agujero descubierto.

1. Inicialmente se perfora la sección.
2. Se corre el sistema EODL con el diablo lanzador hacia la parte inferior y en la parte superior de la tubería expandible se colocan 1 o 2 elastómeros, dependiendo del diseño.
3. Se bombea el cemento con un largo tiempo de fraguado.
4. Después del cemento se manda un dardo (en la parte final del cemento). El dardo sirve de seguro para que el cemento no se regrese, este dardo se aloja en la canasta, para obturar con todo el equipo flotador y aislar el fondo para crear la cámara de presión.

Debido a que se incrementa la presión hidráulica y se forma una cámara de presión, el diablo comienza a deslizarse hacia la parte superior llegando a completar la expansión de toda la sección del tubo.

5. Se limpia el cemento que quedó en la tubería y se muele la canasta o diablo lanzador.

En ocasiones es utilizado el puerto de llenado para cuando existen presiones de surgencia. Este fue creado para admitir fluido y subirlo hacia la sarta de trabajo.

VENTAJAS

Este sistema se puede utilizar en aguas profundas, donde se requiere un diámetro adecuado de la última tubería de revestimiento.

Al utilizar este sistema no se requieren herramientas de registros especiales para pozos esbeltos, únicamente registros convencionales.

El diámetro de la tubería corta a una profundidad total es mayor que el de programas convencionales y facilita la conversión de un pozo exploratorio a uno de desarrollo.

El sistema cuenta con las siguientes características:

- ✓ Se alcanza un mejor programa que con tubería convencional.
- ✓ Se mejora el potencial de producción, debido a los diámetros que se manejan.
- ✓ Se ahorra en el pozo en soluciones de contingencia en una variedad de ambientes de perforación.
- ✓ Se tienen operaciones más baratas para desviar o sellar zonas problema y seguir perforando aplicando un sistema como este.

APLICACIONES

Es usado para resolver problemas de pérdida de circulación en zonas problema de obturación, donde el gradiente de presión y fractura es crítico.

Se utiliza en zonas de flujo de aguas someras, aguas profundas en ambientes de bajo gradiente de fractura y ambientes de domos salinos.

Se aplica en campos viejos que reciben un nuevo desarrollo, ya que el sistema EODL auxilia para alcanzar yacimientos más profundos y aísla zonas que tienen reentradas horizontales.

También es útil en problemas de estabilidad del agujero en ambientes de desafío geológico, ya que en cualquier momento se requerirá una sarta para cubrir el agujero.

Visualizando estas aplicaciones se observa que sería ideal para la Zona Marina, ya que existen problemas de pérdida de circulación en la Brecha del Paleoceno, así como gradientes de presión y fractura críticos.

Otra aplicación en México para este sistema sería para reperforar pozos en yacimientos como el que se encuentra debajo de la Zona de Cantarell, ya que se aprovecharían pozos ya existentes y se obtendrían grandes beneficios.

3.2.2 SISTEMA DE TUBERÍA CORTA EXPANDIBLE PARA AGUJERO REVESTIDO

Este sistema repara el daño existente en tuberías de revestimiento o desgastes causados por la perforación u otras contingencias para seguir perforando. También recubre zonas donde se realizaron reentradas.

El diámetro interno resultante es todavía suficientemente grande para introducir herramientas y el equipo de producción puede soportar operaciones de perforación abajo del liner instalado.

El sistema es similar al sistema anterior a diferencia de que es corrido en toda la sección revestida.

PROCEDIMIENTO

El proceso es similar al anterior, a diferencia que en lugar de cemento en toda la sección se coloca el elastómero (Figura 3.22).

Pasos del procedimiento:

1. Se limpia la sección que se desea revestir.
2. Se introduce el sistema de tubería corta expandible para agujero revestido.
3. Se expande el sistema.
4. Después de que el sistema es expandido, se le realiza a la tubería una prueba de presión.

5. Finalmente se limpia la sección moliendo el diablo lanzador.

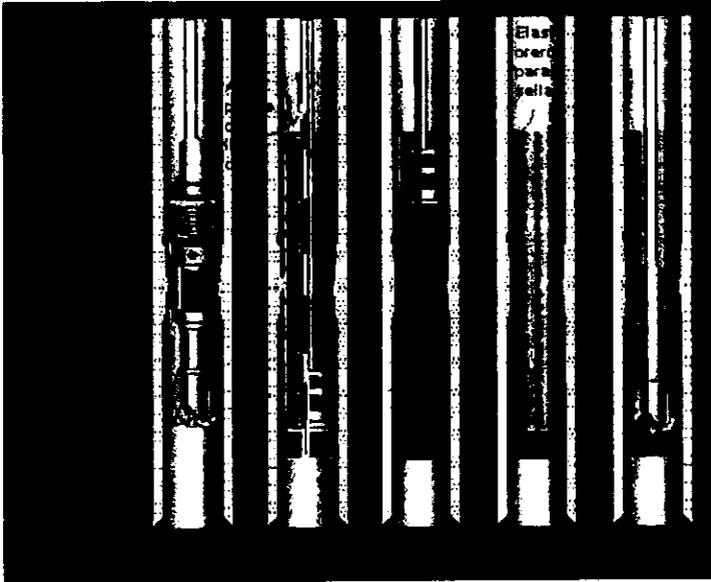


Figura 3.22 Secuencia de la corrida del sistema de tubería corta expandible para agujero revestido.

ESPECIFICACIONES DE LOS SISTEMAS DE TUBERÍA CORTA DE PERFORACIÓN EXPANDIBLE PARA AGUJERO DESCUBIERTO Y TUBERÍA CORTA EXPANDIBLE PARA AGUJERO REVESTIDO

Actualmente se encuentran disponibles en el mercado algunos diámetros del sistemas de tubería corta expandible para agujero descubierto y revestido, los cuales se muestran en la Tabla 3.1, estas dimensiones a medida que se tenga un mayor mercado variarán, es decir, se podrán encontrar una variedad de tamaños convencionales para poderlos adecuar a diferentes condiciones.

Como se mencionó anteriormente la tubería base es la tubería donde se alojará la tubería corta expandible. Aún no se desarrollan sistemas de tubería corta expandible que sean alojados en tuberías expandibles, por ello, con cada tubería base se podrá ahorrar solo una sarta desde el fondo hasta la superficie debido a que será sustituida por la tubería corta expandible.

Tabla 3.1 Especificaciones de los sistemas de tubería corta de perforación expandible para agujero descubierto y tubería corta expandible para agujero revestido disponibles.

Tubería de revestimiento base					Dimensiones de los sistemas de liner expandible para agujero descubierto y revestido (pulgadas aproximadas)				
D est. (pg.)	Peso (lb/pie)	D int. (pg.)	Pared (pg.)	Dritt Int (pg.)	Antes de la expansión		Pared Inicial	Después de la Expansión	
					D Ext.	D Int.		D Int.	D Ext.
16	84.00	15.010	0.495	14.822	13.375	12.615	0.380	14.250	15.010
13.375	72.00	12.347	0.514	12.191	11.750	11.000	0.375	11.614	12.326
11.750	60.00	10.772	0.489	10.616	9.625	8.921	0.352	10.000	10.667
9.625	47.00	8.681	0.472	8.525	7.625	6.969	0.328	7.973	8.629
7.625	29.70	6.875	0.375	6.750	5.500	5.012	0.244	6.210	6.674
7.000	26.00	6.276	0.362	6.151	5.500	4.892	0.304	5.507	6.088
5.500	17.00	4.892	0.304	4.767	4.000	3.548	0.226	4.460	4.889
5.000	18.00	4.276	0.362	4.151	3.500	3.094	0.203	3.816	4.222

VENTAJAS

El sistema de tubería corta expandible para agujero revestido cuenta con las siguientes ventajas:

- ✓ Reparar y reforzar tuberías de revestimiento dentro del pozo.
- ✓ Minimizar la reducción del diámetro interior de la tubería de revestimiento.
- ✓ Permitir una rehabilitación más económica en reentradas, garantizando su aislamiento.
- ✓ Prevenir abandonos prematuros de pozos.
- ✓ Proporcionar un control del perfil del pozo.

APLICACIONES

Este sistema puede aislar tuberías de revestimiento que hayan sido utilizadas para producción como en el caso de la Zona Marina y al terminar la operación se obtendrá mayor resistencia.

Este sistema puede ser aplicado no solamente a pozos marinos sino a pozos en tierra donde la producción del aceite absorbiera los costos del sistema. A primer

instancia se pensaría en la Región Sur debido a que se podrían reparar tuberías y profundizar en los yacimientos por su buena producción.

Se debe pensar en aplicarla en pozos viejos, ya que la resistencia de la tubería soportaría seguir perforando si se desea hacer una profundización.

3.2.3 SISTEMA COLGADOR EXPANDIBLE DE TUBERÍA CORTA

Este sistema combina los requerimientos funcionales de un colgador de tubería corta y un sello superior de tubería corta, mientras minimiza la necesidad de utilizar cementación forzada en la cima del liner, ya que el sistema es tanto un colgador de tubería corta y un sello superior de tubería corta, así este sistema elimina la necesidad de utilizar empaques para anclar el colgador.

La construcción del sistema elimina posibles fugas en el espacio anular durante el fraguado y en la vida del colgador. Una vez que el colgador de tubería corta es colocado, el perfil interior disponible para flujo de la sección transversal aumenta (Figura 3.23).

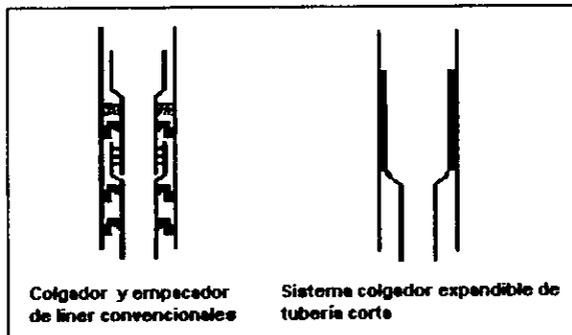


Figura 3.23 Esquema de colgadores de tubería corta, convencional y expandible.

Con este sistema no se expande toda la sección del liner, únicamente el intervalo del colgador para formar el sistema expandible de tubería corta para proporcionar la funcionalidad del empaecedor de la tubería corta.

Mientras se realiza el proceso de expansión, el diablo pule la superficie, resultando un agujero liso, así el colgador de tubería corta puede actuar como un receptáculo para alguna clase de tie backs (complementos).

Una de las compañías que distribuye este sistema de colgador expandible de tubería corta realizó una prueba con un prototipo del colgador expandible de tubería corta de 5 ½ x 7" y estuvo expuesto al sacarlo del pozo a fuerzas mecánicas de casi 102,058 Kgf e integridad hidráulica mayor a 3,000 psi.

PROCEDIMIENTO

Una conceptual secuencia de corrida para el sistema de colgador expandible de tubería corta es ilustrada en la Figura 3.24.

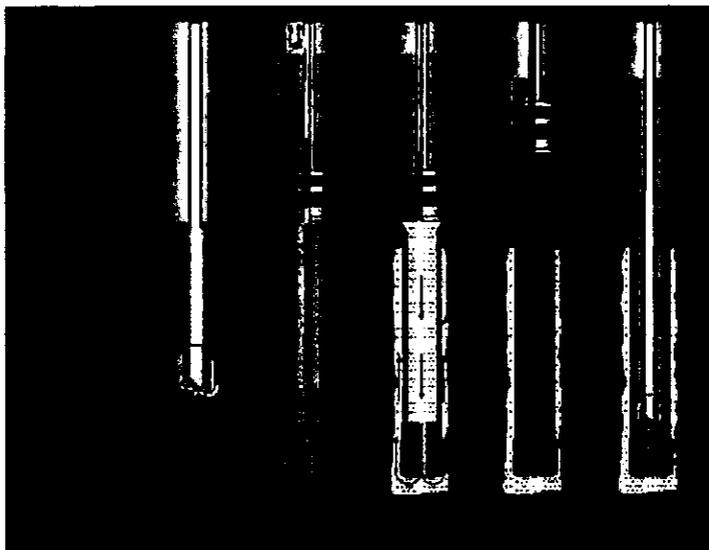


Figura 3.24 Secuencia de la corrida del sistema colgador expandible de tubería corta.

A continuación se mencionan los pasos del procedimiento:

1. Se selecciona la sección de perforación.
2. Se corre y cuelga el sistema de liner colgador expandible.
3. Se bombea el cemento.
4. Se expande el sistema de colgador expandible de tubería corta.
5. Se limpia la sección intervenida.

A diferencia de los dos sistemas expandibles anteriores, se pueden realizar diferentes técnicas para la expansión del colgador, las cuales son de forma ascendente y de forma descendente. Los procedimientos son similares y solo se menciona el primero (de forma ascendente, es decir expandiendo al colgador del fondo a la cima).

VENTAJAS

El colgador expandible de tubería corta tiene las siguientes ventajas:

- ✓ Proporciona construcción sólida que previene trayectorias de fuga en el espacio anular.
- ✓ Minimiza el perfil de espacio anular e incrementa el interior de la sección transversal disponible para el flujo.
- ✓ Combina el colgador y el sello de la cima de la tubería corta, eliminando la necesidad para una segunda corrida para instalar el empacador superior de tubería corta.
- ✓ Su colocación es rápida y fácil.

TAMAÑOS DISPONIBLES DEL SISTEMA DE COLGADOR EXPANDIBLE DE TUBERÍA CORTA

Hasta el momento, se cuenta con colgadores expandibles de tubería corta para ser usados en los siguientes tamaños

- ✓ 13 3/8"
- ✓ 7 5/8 (o 7)"
- ✓ 5 1/2"
- ✓ 3 1/2 "

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

La Figura 3.25 muestra un sistema colgador expandible de tubería corta.

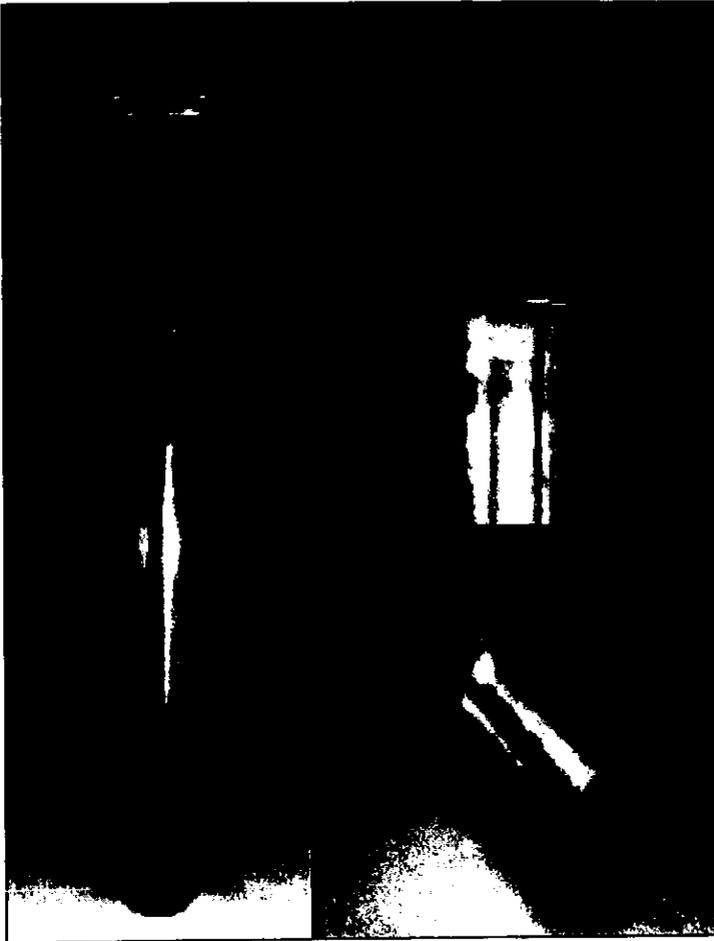


Figura 3.25 Sistema colgador expandible de tubería corta.

3.3 APLICACIONES HISTÓRICAS

Para tener una mayor visualización de las aplicaciones mencionadas en el presente trabajo, así como para tener toda la certeza de que estos sistemas han sido probados, a continuación se mencionan algunas aplicaciones históricas en diferentes partes del mundo, como:

- **APLICACIÓN DE UN SISTEMA RANURADO DE MALLA EXPANDIBLE PARA CONTROL DE ARENA**
- **APLICACIONES EN PRUEBAS DE CAMPO**
- **GOLFO DE MÉXICO**

- **APLICACIÓN DE UN SISTEMA RANURADO DE MALLA EXPANDIBLE PARA CONTROL DE ARENA ^{2/}**

Esta aplicación se llevó a cabo en el campo Rahab que esta localizada en el Flanco oriental de la cuenca salada del sur de Oman, a unos 20 Kilómetros al suroeste del Campo Marmul en el sur Sultanate de Oman, en el Golfo Pérsico.

El campo Rahab fue descubierto en 1977 y perforado sobre un riachuelo en 1981, contaba con un total de 25 pozos verticales con producción. Cuando se hizo el análisis 21 pozos producían 207 m³/día de aceite con 81% de agua (1080 m³/día brutos). Los 4 pozos restantes se cerraron y abandonaron. La mayoría estos pozos fueron terminados con empacamiento de grava.

En este campo existe bajo potencial y este es atribuido a la combinación de yacimientos locales desarrollados en áreas cercanas, la arena lateral continuamente en los yacimientos Gharif y la severa declinación de la presión del yacimiento, por ello se requería de bombeo mecánico.

El yacimiento es una simple estructura domal, esta dividido en 3 unidades, unidad superior, unidad media, unidad baja 1 y unidad baja 2 Gharif. Inicialmente el empuje del yacimiento se debía a un pequeño acuífero. Las propiedades del yacimiento y las propiedades de fluido de la unidad media son tabuladas en la Tabla 3.2.

^{2/} Trial of an expandable sand screen to replace internal gravel packing. Mark Van Buren, Et al. SPE/IADC Noviembre de 1999.

Tabla 3.2 Propiedades del yacimiento Gharif Medio.

PROPIEDAD	UNIDADES
Porosidad	27 %
Permeabilidad	100 – 1400 Mili Darcies (MD)
Temperatura del yacimiento	46 °C
RGA inicial	0.7 m ³ /m ³
Densidad del aceite	26 °API
Viscosidad @ 50 deg C	75 Mili Pasc-s (Mpa-s)
Espesor neto del yacimiento	30 metros

A finales de 1997 se llevó a cabo un estudio analizando todos los pozos y varios mostraron abundante producción de arena. Por ello se necesitaba que no hubiera arena en el fondo del pozo, debido a que las instalaciones en la superficie no podían maniobrar esta.

El bajo potencial de afluencia arrojó resultados que no eran factibles económicamente si se usaba un empacamiento convencional con grava para la exclusión de arena porque el yacimiento tenía una producción sostenida de arena a través de los empacamientos de grava instalados anteriormente. Debido a ello se requería de otro método para que se siguiera desarrollando el campo, por lo que se optó por el sistema ranurado de malla expandible para control de arena, ya que utilizando este sistema no se tendría problema con la arenisca.

Los objetivos del proyecto aplicando el sistema ranurado de malla expandible para control de arena fueron los siguientes:

1. Desarrollar los yacimientos.
2. Evaluar la tecnología funcional y económicamente del sistema ESS para un reemplazamiento total del convencional empacamiento con grava.
3. Probar la técnica de instalación del sistema ESS.

Así como el propósito de este trabajo es reportar los resultados del proyecto.

La prueba de la aplicación fue conducida en Diciembre de 1998 y la aplicación de la tecnología expandible ESS se llevó a cabo en enero de 1999.

En la prueba se utilizó un sistema de 5 metros para que fuera expandido sin ser lubricado, este sistema tenía el mismo diámetro de la tubería base (5 ½") y 230 micras de filtro tejido como el que era utilizado antes de la intervención.

El propósito de trabajar antes en la prueba fue:

- ✓ Monitorear las fuerzas de expansión requeridas para expandir.

- ✓ Apreciar el efecto de variar la velocidad de expansión.
- ✓ Tener la suficiente confianza para la expansión de una mayor longitud.
- ✓ Examinar el filtro de comunicación por algún signo de degradación o desgaste después de la expansión.

Así como también la prueba sirvió para subrayar algunas deficiencias de fabricación.

El resultado final de la prueba fue satisfactorio y los resultados de la operación servirían para la siguiente intervención.

Se varió la velocidad de la expansión a la mitad del sistema ESS para ver como podría afectar esto al material y tener mayor conocimientos del comportamiento del sistema pero los cambios no fueron representativos. Con todo esto el tejido de la malla no se rompió.

SELECCIÓN DE POZOS CANDIDATOS

Se seleccionaron los pozos en los que se aplicaría la tecnología en un nuevo intervalo perforado en el yacimiento Gharif Medio, mediante las siguientes consideraciones:

- ✓ Requerimiento de exclusión de arena.
- ✓ Bajo potencial de afluencia.
- ✓ Resultados de una terminación con empacamiento de grava cercano a la zona de interés.
- ✓ Gasto de producción estable desde la zona del fondo preexistente permitiendo la determinación de la contribución de la producción desde la zona de interés.

ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA RANURADO DE MALLA EXPANDIBLE PARA CONTROL DE ARENA

El tamaño de la rendija del sistema ESS fue de 235 micras, los cálculos fueron basados en los resultados de un núcleo del yacimiento Gharif Medio. El tamaño que dominaba estaba entre 80 y 420 micras, pero la distribución mostró que la mayoría de tamaños grandes de arena debían estar entre 125 y 250 micras.

Se diseñó el área de traslape entre los disparos y la base expandida del tubo ranurado como se presenta en la Figura 3.31.

Se seleccionaron 45° para el espaciamiento de los disparos, ya que fue el patrón óptimo para reducir el traslape entre la tubería expandida y la tubería de revestimiento existente.

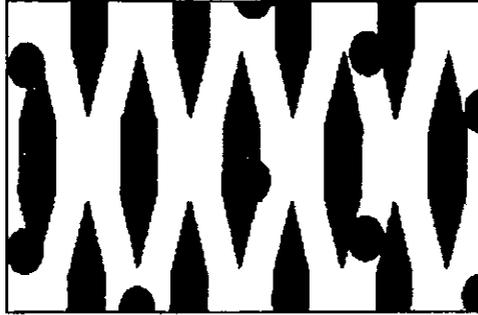


Figura 3.26 Traslape del patrón de disparos y base de tubo expandido.

El diseño de terminación consistió en 3 principales componentes, ver Figura 3.27.

1. Empacador de producción.
2. Sistema ranurado de malla expandible para control de arena.
3. Ensamble sello con seguro de presión.

INSTALACIÓN DEL SISTEMA ESS

Después de limpiar el intervalo se circuló salmuera para que quedara limpio el pozo. Mas tarde se dispararon 2 pistolas TCP.

Posteriormente, los huecos de los disparos fueron limpiados con ácido usando una herramienta lavadora con cubeta limpia tubos.

Más tarde se procedió a colocar el sistema ESS a través de la zona recién perforada. La secuencia de instalación es ilustrada en la Figura 3.28, que representa la fase de desplazamiento, la fase de expansión y la fase de cuando quedó instalado el sistema.

El empacador de producción retuvo al sistema ESS durante la expansión. El sistema fue expandido contra el interior de la TR 9 5/8" a través de la zona recién limpiada para eliminar el espacio anular entre la tubería de revestimiento y el sistema ESS. El diámetro exterior del sistema ESS sin expandir era de 5.906".

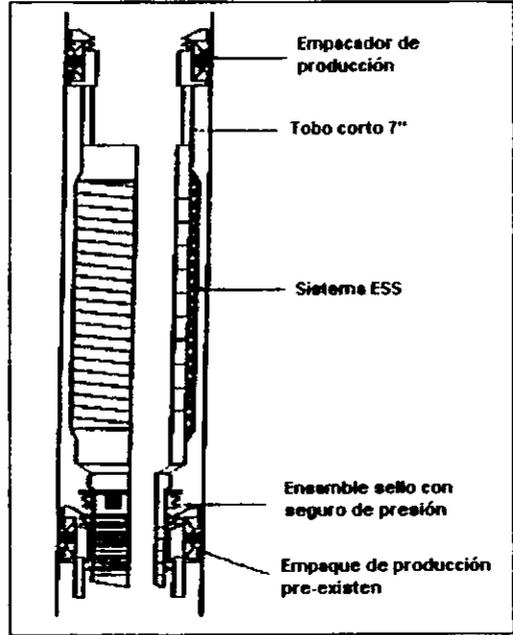


Figura 3.27 Componentes de terminación.

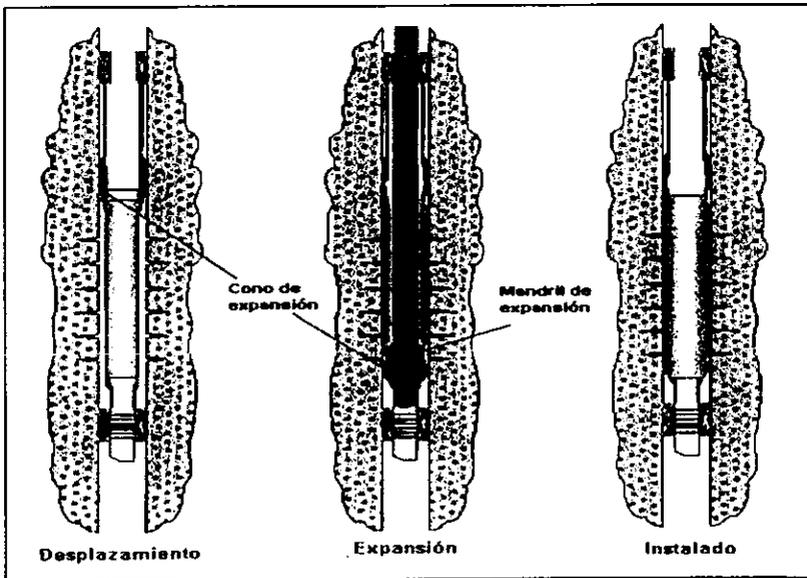


Figura 3.28 Secuencia de instalación del sistema de malla expandible para control de arena.

En la literatura no se menciona la longitud de la sección solo que esta se ensambló primero en dos partes debido a su gran longitud, tampoco se menciona a que profundidad fue instalado.

La cima del conector del sistema ESS fue fabricada especialmente para que acoplara en el emparador de producción. Así también el seguro del sello se fabricó específicamente para el fondo del sistema ESS.

La instalación se llevó a cabo con tubería de perforación de 3 ½". Después de la instalación se probó con éxito el emparador de producción.

La fuerza de expansión fue calculada para ser aproximadamente 10 kdaN, pero durante la operación la relación de expansión fue controlada a 3 m/min manteniendo la fuerza de expansión ligeramente constante para un peso indicado de 10 a 12 kdaN.

Cuando el cono de expansión abandonó el fondo, se colocó un peso de 20 kdaN en el fondo para confirmar la completa expansión. Posteriormente, se sacó del agujero la sarta de expansión

Los datos de la prueba de producción se ilustran en la Figura 3.29 mostrando una producción inicial bruta incrementada de 65 m³/día, rápidamente bajando a una producción bruta sostenida de 28 m³/día después de la instalación del sistema ESS.

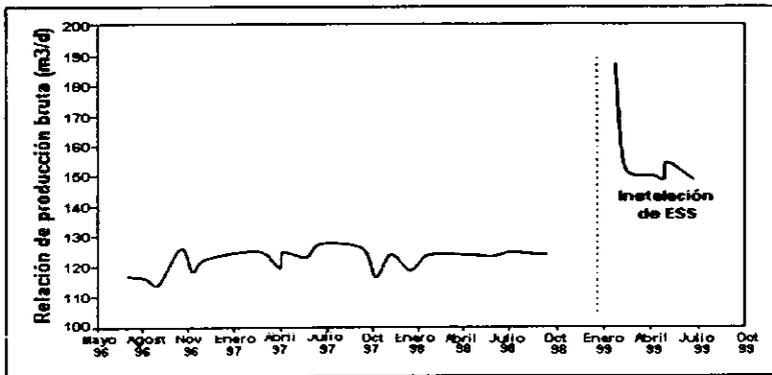


Figura 3.29 Historia de gasto de producción neto de aceite del campo Rahab.

Con los datos que se muestran en la Figura 3.30 se observa que la cantidad de aceite neto fue de 8.4 m³/día.

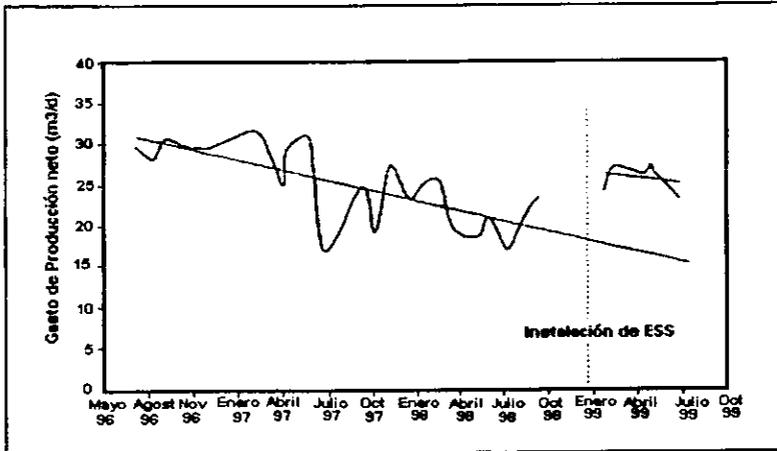


Fig. 3.30 Historia de la relación de producción bruta del campo Rahab.

Las medidas de arena, como se muestra en la Figura 3.31, proporcionan evidencia de que el filtro medio del colador se encontraba intacto. Los resultados iniciales de producción de arena mostraron que al momento de la instalación era alta pero se fue estabilizando rápidamente. Esto se cree que es debido a la producción inicial de escombros de perforación y formación aglomerada (aplastada) creada durante los disparos.

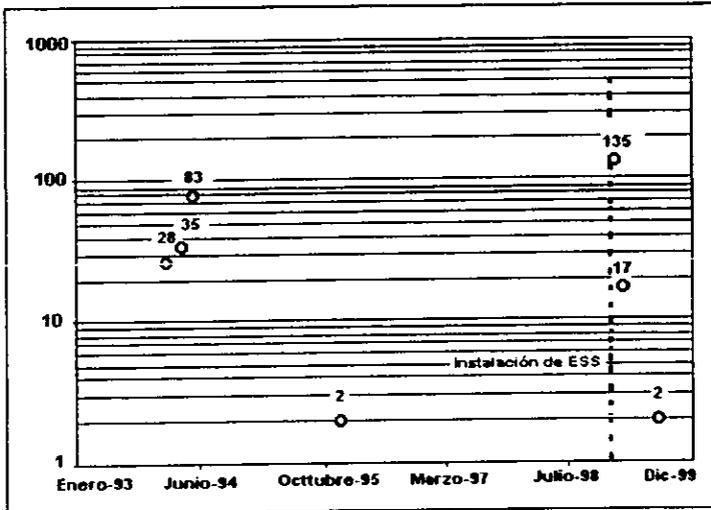


Figura 3.31 Medidas de arena producida en el campo Rahab.

➤ APLICACIONES EN PRUEBAS DE CAMPO ^{3/}

Se planearon tres aplicaciones en pruebas de campo para evaluar el sistema de tubería corta alternativa expandible (ABL). Se tomaron en cuenta ambientes costa fuera, costa dentro (aguas dentro del continente como: zonas pantanosas, ríos) y en tierra, las cuales fueron:

- a) Prueba en Montrosa.
- b) Prueba en el Mar del Norte.
- c) Prueba en Texas.

a) PRUEBA EN MONTROSA

Esta aplicación se llevó a cabo en un pozo costa dentro en Montrosa, Escocia. En la aplicación se utilizó un sistema ABL para aislar un intervalo de 670 a 760 metros. El pozo tenía un agujero descubierto de 8.5". El diámetro del ABL fue ampliado a 10".

Se utilizó una barrena tricónica para obtener el agujero del diámetro requerido, ya que debido a que la arenisca era muy dura no se pudo perforar con una barrena de policristalino (PDC).

Se utilizó un calibrador y un arreglo sónico para tomar registros y confirmar la geometría del agujero.

PROCEDIMIENTO

La cima del sistema ABL fue conectada al mandril de expansión atornillado con esfuerzo cortante y corrida dentro del pozo sobre la tubería de perforación. Una zapata de aluminio (perforable y expandible) fue conectada al fondo del sistema ABL con tornillos Allen para distribuir las cargas, ya que esta actúa como receptáculo para el dardo de cemento, y permite la circulación del cemento a través del fondo del sistema ABL y el espacio anular.

Se instaló un arco expandible especialmente diseñado para centralizadores sobre el sistema ABL para asegurar una cementación uniforme en el agujero descubierto.

^{3/} An expandable slotted tubing fiber cement wellbore lining system. R. B. Steward, Et al. SPE Drilling & Completion, Septiembre de 1997.

El sistema ABL fue corrido dentro del agujero desviado sin incidentes hasta los últimos 92 metros (el agujero tenía 40° de desviación con doblez (pata de perro) arriba de 0.0927 °/m). Con el montaje levantado (con la sarta de perforación estabilizada localizada alrededor del sistema ABL y mandril de expansión), lodo circulador, el peso colocado abajo se incremento a 6,800 Kgf al pasar por la restricción (pata de perro). Más tarde el sistema ABL fue corrido dentro sin problemas.

El sistema ABL en los tres campos de prueba fue soldado en el piso de trabajo (prueba Montrosa, en el Mar del Norte y en Texas).

La fibra cemento (con 10% de exceso) fue desplazada con un tapón balanceado, esto para su perfecto desplazamiento.

El esfuerzo de rotación sobre el mandril de expansión fue colocado a 9,340 Kgf. Sin embargo, el arrastre en el agujero resultó con alguna sacudida requerida para deslizar el tornillo. El sistema ABL fue expandido en compresión (la fuerza de expansión diseñada era de 5 a 7 toneladas) hacia el fondo. La fuerza de fricción registrada en la plataforma Martin Decker fue mayor a la calculada (aproximadamente 13 toneladas).

El cono de expansión fue arrastrado hacia la superficie en el interior de la cima a 3 metros del sistema ABL y el exceso de cemento fue circulado hacia fuera. Finalmente el sistema ABL fue expandido a 8.5" y se tuvo que esperar 24 horas para que fraguara el cemento.

RESULTADOS DE LA OPERACIÓN

La cima de cemento fue tocada con la sarta a 3 metros en el interior del sistema ABL y limpiada sin dificultad. El registro del calibrador ultrasónico de imagen del agujero (UBI) mostró que el sistema ABL había sido expandido al mismo diámetro (8.5") como la tubería de revestimiento, esto se muestra en la Figura 3.32.

Se aplicó 1,000 psi para verificar la capacidad del sello (si existía fuga o no) en toda la longitud del empacador de prueba y no se observó flujo axial en el espacio anular.

La prueba fue satisfactoria ya que no se presentaron problemas posteriores.

b) PRUEBA EN EL MAR DEL NORTE

La aplicación se realizó en un pozo costa fuera en el Mar del Norte. El pozo revestido se encontraba en una plataforma semi sumergible La Henry Goodrich.

Se deseaba confirmar la integridad de la fibra cemento en ambientes del Mar del Norte, así como saber que problemas posteriores podrían ocurrir cuando el sistema fuera instalado.

Se encontraron problemas con la ampliación, ya que únicamente 40 metros de los 110 metros planeados pudieron ser ampliados para el mismo diámetro aceptable de 10". Esto ocurrió debido a la alta resistencia de la formación.

PROCEDIMIENTO

El sistema ABL de 107 metros fue instalado en el pozo con 30° de desviación en un intervalo de 3,390 a 3500 metros, que tenía un dobléz (pata de perro) menor que 0.03048 °/m. La fibra cemento fue desplazada en el intervalo y el sistema ABL fue expandido por encima de los primeros 40 metros. La fuerza de expansión requerida estuvo entre 5,080 y 7,110 Kgf. El montaje, instalación, y expansión del sistema ABL se realizaron fácilmente.

RESULTADOS DE LA OPERACIÓN

Después de 30 horas se tocó la cima de cemento la cual estaba todavía fresca, debido a esto se lavo completamente la sección. El cemento estaba contaminado debido a varios factores, como el fracaso del sistema de tapón limpiador, ya que estaba contaminado con salmuera.

El registro UBI mostró que el sistema ABL había sido expandido únicamente para proporcionar el diseño del diámetro interno, ya que el cemento no había fraguado.

A pesar de la pobre calidad de cemento, este impidió el flujo del lodo de perforación en la dirección axial.

Los resultados finales mostraron que el equipo y los procedimientos de cementación fueron inadecuados. Se confirmó también, que se requería de una excelente ampliación de agujero para que la operación tuviera éxito.

c) PRUEBA EN TEXAS

La aplicación se realizó en un pozo de Texas. El pozo se situaba en tierra.

Se requería resolver problemas que habían tenido con ampliaciones y cementaciones en pruebas anteriores. Existían nuevos requerimientos, se desarrolló un nuevo ampliador de 11" y tres sistemas de tapones de desplazamiento de cemento.

Por primera vez, las ranuras del sistema ABL fueron llenadas (cubiertas) con resina de poliuretano para ayudar a las operaciones de corrida y cementación y para que no se contaminara el cemento.

RESULTADOS DE LA OPERACIÓN

En el proceso se corrieron 76 metros del sistema ABL en una sección escariada vertical de 11" de agujero justo debajo de la tubería de 9.625" a 2,530 metros. El sistema ABL fue cementado, expandido, limpiado y probado con presión con éxito.

La Tabla 3.3 resume los resultados de las tres pruebas de aplicaciones en campo.

Tabla 3.3 Resultados de las pruebas de campo del sistema ABL.

PRUEBAS DE CAMPO DEL SISTEMA ABL				
Localización del pozo	Profundidad m	Desviación Grados	Longitud del ABL m	Tipo
Monrosa Reino Unido	840	40	50	Costa adentro (Plataforma Martin Decker)
Mar del Norte Reino unido	3,400	30	107 (solamente expandibles 42 m)	Costa afuera (Semi sumergible Henry Goodrich)
Texas Estados Unidos	2,600	0	79	Terrestre

> GOLFO DE MÉXICO 4/

La aplicación se realizó fuera de las aguas del estado de Louisiana en el Golfo de México, en el pozo OCS-6-1351 #23 en West Cameron Block 48.

La aplicación se llevó a cabo en Noviembre de 1999.

4/ Expandable casing program helps operator hit TD with larger tubulars. William Furlow. Offshore, Enero de 2000

Se requería tubería de revestimiento expandible sólida y se utilizó el sistema de tubería corta expandible de perforación para agujero descubierto.

Se encontraban perforando y se encontró con una zona de presión anormal. Es decir, debido a que se habían aislado intervalos agotados y con pérdida de circulación con tubería de revestimiento, ya se habían utilizado varios sistemas de lodos sin éxito. La solución más económica en este caso, fue usar tubería expandible sólida. Esta tubería reduce muy poco el tamaño de agujero, pero esta reducción es requerida para alcanzar la aislación.

PROCESO

Los resultados de programas de tubería de revestimiento mostraron que se requería una tubería de revestimiento en superficie, seguida de una tubería de revestimiento de 9 5/8" colocada en la zona de presión de transición, un sistema de tubería corta de perforación expandible para agujero descubierto de 7 5/8" x 9 5/8" justamente encima del intervalo agotado, un liner de 7" abajo del intervalo agotado y finalmente un liner de 5" a la profundidad total.

Otro programa alternativo requería de tubería de revestimiento en superficie de 16" o 13 3/8", tubería de revestimiento de 11 5/8" o liner, tubería de revestimiento de 9 5/8", liner de 7" y otro liner a la profundidad total de 5".

Finalmente se optó por el primer diseño que contenía a la tubería expandible sólida.

Se requirieron 4 juntas de tubería expandible. Estas juntas eran de 9 5/8" y tenían un peso nominal de 47 lb/pie, esta tubería tenía que sellar la tubería usada arriba de estas juntas de 53.5 lb/pie.

Las 4 juntas fueron inspeccionadas perfectamente antes de que fueran desplazadas dentro del agujero para determinar irregularidades u ovalidad que pudiera afectar el diseño óptimo del diablo.

Se diseñó una rosca especial para conectar las juntas, así el conector mantendría un sello durante las 4 juntas.

En la parte superior de la sarta se conectó una junta especial de colgador de tubería corta que incluyó un revestimiento externo con elastómero y un anillo externo de acero, esta junta formó el sello metal a metal.

Se construyó una base que quedó sobre el piso de perforación para que las juntas expandibles no se ladearan al momento de la instalación.

Se requirieron aproximadamente 4 ½ horas para expandir la tubería de revestimiento, mientras que el cemento fue bombeado en 30 minutos. El cemento

bombeado acumuló una presión de aproximadamente 3,900 psi antes de que el diablo comenzara a desplazarse, atrás del diablo se bombeo lodo lubricante.

Se monitoreaba en la superficie una carga de 2,270 a 4,540 Kg.

Al pasar el diablo por la unión de las juntas se requirió mayor presión, pero después de esta zona la operación siguió normal.

RESULTADOS FINALES

Se expandieron 290 metros del sistema EODL, antes de la expansión tenía una longitud de 300 metros, lo que indica una reducción del 3.34% (acortamiento). cuando terminó la operación, las conexiones, sistema EODL y traslape de la tubería corta se probaron con presión obteniendo un resultado satisfactorio.

El sello mecánico que formaba la parte superior tuvo una fuerza mecánica mayor de $342 \text{ lb} / \text{pg}^2$ y un sello hidráulico de más de $70 \text{ psi} / \text{pg}^2$ de presión diferencial.

En el traslape del liner se calculó una presión diferencial negativa de 2,164 psi, ya que cuando se perforó esa sección la densidad del lodo fue reducida a 0.479 gr/cm^3 para trabajar en el intervalo agotado.

Posterior a esta aplicación, se intervino un pozo de prueba también con un sistema EODL de las características del anterior en un pozo en Lafayette, Louisiana.

La prueba de cemento incluyó el mismo cemento retardador que tuvo que ser usado en la aplicación costa fuera. En el pozo de prueba se utilizó la misma densidad de lodo lubricado que tuvo que ser usado en la aplicación real para expandir la tubería.

La prueba fue exitosa, ya que no se presentaron problemas posteriores. La única diferencia entre el pozo de prueba y la aplicación real fue que en el pozo de prueba, la tubería fue expandida por lingadas porque el equipo costa fuera tenía un sistema TOP-DRIVE.

4. COSTOS

En todo proyecto un punto muy importante son los costos, ya que repercute en la factibilidad o no del mismo. En proyectos de ingeniería petrolera se invierten millones de dólares, de manera que cualquier reducción del porcentaje de costos redundará en beneficios aún cuantiosos.

Se indicará la importancia de dichos costos, haciendo referencia a la tecnología convencional y mostrando las bondades de los costos que tiene la tecnología de tubería expandible.

En aguas profundas se realizan inversiones de millones o billones de dólares en programas de tuberías de revestimiento, a fin de alcanzar profundidades totales con diámetros internos mayores, buscando que estos sean suficientes para producir el pozo en forma económica. Este es uno de los aspectos más importantes de dicha tecnología.

La aplicación de la tecnología de tubería expandible debe reducir el monto de inversión del pozo y mejorar el porcentaje de éxito alcanzando objetivos y optimizando el gasto de producción.

Al mismo tiempo, la tecnología ahorra tiempos de perforación y reduce los costos del pozo, ya que este resulta en un agujero final más pequeño.

4.1 INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA

Se piensa que es importante tomar en cuenta la investigación y la tecnología, ya que es de donde parte la tecnología de tubería expandible al igual que cualquier otra.

INVESTIGACIÓN

No es posible pasar por alto la investigación cuando hablamos de tecnología de tubería expandible. De hecho, es gracias a la investigación que se puede desarrollar e implementar dicha tecnología, como respuesta a una necesidad de solución de un problema específico.

Toda investigación requiere por supuesto de un apoyo financiero, dependiendo de la probabilidad de éxito de esta, de acuerdo a ciertas características distintivas, puede realizarse en diferentes planos o sentidos.

De esta manera se visualizan tres tipos de investigación contenidas en un marco general de investigación referente a un mismo tópico. Estas son:

- ✓ Investigación Pura.
- ✓ Investigación Básica.
- ✓ Investigación Aplicada.

INVESTIGACIÓN PURA. Es la que se lleva a cabo cuando se inicia el planteamiento de un problema, en el caso de tubería expandible la investigación pura se refirió a encontrar la aleación del metal idóneo para la tubería.

INVESTIGACIÓN BÁSICA. Es utilizada en problemas específicos que resultan de la investigación pura, en el caso de la tubería expandible la investigación básica se refirió a fabricar la tubería con la aleación encontrada y hacerle las pruebas necesarias para poder garantizar las propiedades físicas y químicas.

INVESTIGACIÓN APLICADA. Es la parte final ya que se utiliza para resolver problemas que se ocasionan en la investigación básica. Se utiliza para perfeccionar y aplicar la investigación en una etapa final. En el caso de la tubería expandible la investigación aplicada se refirió a resolver problemas específicos que se encontraron en las aplicaciones de prueba con la tubería.

Actualmente la tecnología de tubería expandible se encuentra en la etapa de investigación aplicada dado que se están resolviendo problemas específicos, superando la etapa de transición de las dos investigaciones anteriores. Más aún, se están comenzando a obtener beneficios técnicos y económicos de la aplicación de los diferentes sistemas desarrollados.

La Figura 4.1 muestra un diagrama esquemático en el que se ilustran conceptualmente los costos de investigación para un tópico dado. Se pretende que esta sería la trayectoria de costos que seguiría la investigación de la tecnología de tubería expandible, aunque también el diagrama pueda ser aplicable a otros tipos de tecnología.

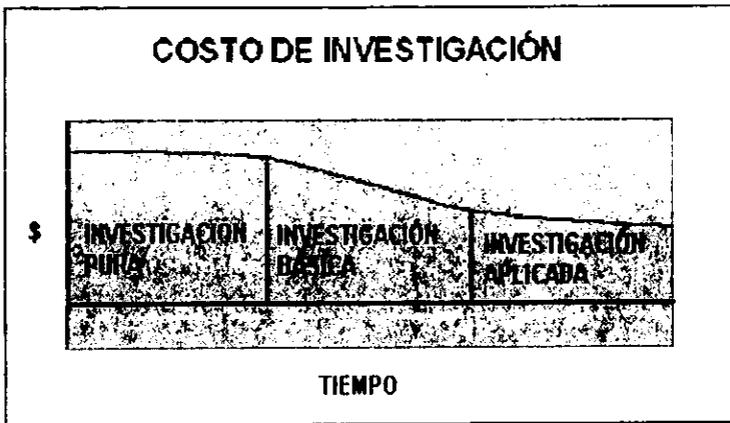


Figura 4.1 Costos de la Investigación por tipo de Investigación.

TECNOLOGÍA

Al igual que la investigación, la tecnología no puede ser pasada por alto, ya que también repercute en los costos. Esta tecnología puede clasificarse de acuerdo a las características de dominio y aplicación que sobre ella se tiene, lo que se logra con el número y experiencias en las que se haya aplicado, los errores enmendados, los caminos recorridos, la problemática resuelta, la evolución de los desarrollos y la naturaleza de las soluciones.

De este modo, por el estado del arte en que se encuentre, la tecnología puede clasificarse en tres tipos:

- ✓ Tecnología Embrionaria.
- ✓ Tecnología en Desarrollo.
- ✓ Tecnología Madura.

TECNOLOGÍA EMBRIONARIA. Es donde se realizan cierto tipo de pruebas para su aplicación posterior, y es donde se comienza a dar a conocer el producto.

TECNOLOGÍA EN DESARROLLO. Se dedica a resolver problemas específicos como resultado de la tecnología embrionaria. Con esta se tendrá más conocimiento del producto y se podrá conocer los límites del mismo.

TECNOLOGÍA MADURA. Es la etapa final de la tecnología donde el producto se aplica confiable y eficazmente teniendo total control de este, manejando la garantía del mismo.

Los tipos de tecnología son los frutos de la investigación aplicada, ya que se encuentran ligadas.

En el caso de la tecnología expandible, esta pasa de ser una tecnología embrionaria a una tecnología en desarrollo, sin llegar a ser una tecnología madura. Esto se debe a que la parte que corresponde a la tecnología embrionaria es un camino ya recorrido durante la investigación del comportamiento de los materiales, la cual puede corresponder a parte de investigación básica y aplicada. Sin embargo, se han realizado investigaciones adicionales encaminadas a la solución de problemas específicos. Esto último permite dar un impulso adicional de desarrollo de dicha tecnología.

Por otro lado, se espera que con el éxito de la aplicación de la tecnología de tubería expandible se abatan los costos de esta, debido a la etapa de investigación y al estado del arte en la que se encuentra.

4.2 VENTAJAS DE LA TECNOLOGÍA EXPANDIBLE

Con la tecnología de tubería expandible se espera reducir significativamente los costos por concepto de perforación, tuberías de revestimiento y terminación de pozos de aceite y gas, así como optimizar sustancialmente los diseños y operaciones de los pozos.

Asimismo, se espera poder perforar yacimientos a profundidades que no pueden ser alcanzados con las técnicas y métodos actuales de la perforación convencional.

También se podrá tener acceso a yacimientos que anteriormente habían sido abandonados por no contar con tecnología adecuada o rentable.

AVANCES DE LA TECNOLOGÍA EXPANDIBLE

Entre las aplicaciones de la tecnología de tubería expandible se pueden contar las siguientes, sin que por ello sean las únicas. De hecho se consideran aplicaciones genéricas, en las cuales se contemplan aplicaciones específicas y que se describieron en los capítulos anteriores de este trabajo.

- ✓ Tener un acceso a yacimientos que no eran alcanzados técnica o económicamente utilizando tecnología convencional disponible.
- ✓ Contar con la habilidad para perforar pozos verticales más profundos y pozos desviados de alcance extendido.
- ✓ Disponer de la habilidad para perforar agujeros más pequeños, los cuales podrían reducir costos y hacer viable la perforación de pozos en aguas profundas.
- ✓ Contar con la capacidad para revivir viejos pozos para revestir el interior de la tubería de revestimiento existente para reparar posibles daños y mejorar su resistencia.

PÉRDIDAS OCASIONADAS EN LA INDUSTRIA PETROLERA

En los casos menos severos se han tenido que abandonar varios proyectos en zonas problema al sacrificar las profundidades de asentamiento de las tuberías de revestimiento antes de alcanzar las profundidades programadas, evitando así llegar al objetivo final.

Por otro lado, se puede incurrir en la pérdida total del pozo, amén de las pérdidas humanas, si se considera no utilizar tecnología expandible, debido, entre otras causas a:

- X Mal diseño del pozo.
- X Número insuficiente de sargas de revestimiento.
- X Profundidad inadecuada de asentamiento de tuberías.
- X Descontrol del pozo.
- X Flujo de aguas someras.
- X Colapsos.
- X Inestabilidad del pozo o arenamiento.
- X Accidente mecánico.

X Inundación de agua.

X Otros.

Tal es el caso de un pozo en Nigeria, donde se llevó a cabo un ejemplo de la pérdida de millones de dólares por falta de tecnología, ya que se ensayó sin éxito con un pozo en el área de Gjallarryggen localizado en una profundidad de agua de 1340 metros, se tuvo que abandonar debido a que se utilizaron todas las tuberías de revestimiento antes de llegar al objetivo.

RIESGO

La tecnología expandible no desaparece el riesgo de ocurrencia de la problemática descrita, pero lo reduce de un 100% a un 40%, con resultados comprobables, en ejemplos mencionados anteriormente, encontrados en la literatura.

Con ello se estará trabajando con mayor seguridad enfocando la atención a otros problemas.

4.2.1 BENEFICIOS TÉCNICOS DE LA TECNOLOGÍA EXPANDIBLE

Con la tecnología expandible se pueden beneficiar las tuberías de revestimiento, con menos cambios, así también se puede incrementar el número de sargas en aguas profundas, domos salinos y otros ambientes difíciles.

Además de los anteriores, se pueden considerar otros beneficios utilizando la tubería expandible como:

- ✓ Mejores diseños de tuberías de revestimiento.
- ✓ Menores volúmenes de fluidos de perforación y de control.
- ✓ Menores volúmenes de lechadas de cemento.
- ✓ Menor número de barrenas.
- ✓ Menores tamaños de pozos.

También se cuenta con ayuda en el diseño de pozos de alta presión y alta temperatura, donde los requerimientos para las sargas de tubería de revestimiento pueden ser excesivos.

Por lo tanto, se puede resumir en los siguientes puntos, los beneficios técnicos descritos.

- ✓ Beneficios en diseño de sartas.
- ✓ Beneficios en la capacidad de producción.

BENEFICIOS EN DISEÑO DE SARTAS

En profundidades de agua mayores de 1,500 metros, el total de los costos ahorrados podrían ser enormes. Por ejemplo, la tecnología de tubería expandible se podría aplicar para diseñar y crear pozos que comenzaran con tubería de revestimiento de 14" en vez de 36", en ambientes de aguas profundas (Figura 4.2).

Debido a que con la tubería expandible se utiliza menos tubería, también se tendría menor cantidad de tubería en superficie para maniobrar, así como menor cantidad de fluidos de perforación. Esto se observa también en la aplicación de la tecnología de pozos de diámetro reducido.

Los ahorros de agujero dependen del diseño del pozo y el tamaño de las tuberías de revestimiento diseñadas a la profundidad total del objetivo productor, para profundidades entre 1,500 y 2440 metros de tirante de agua, así como de la capacidad para manejar contingencias y tener las herramientas adecuadas.

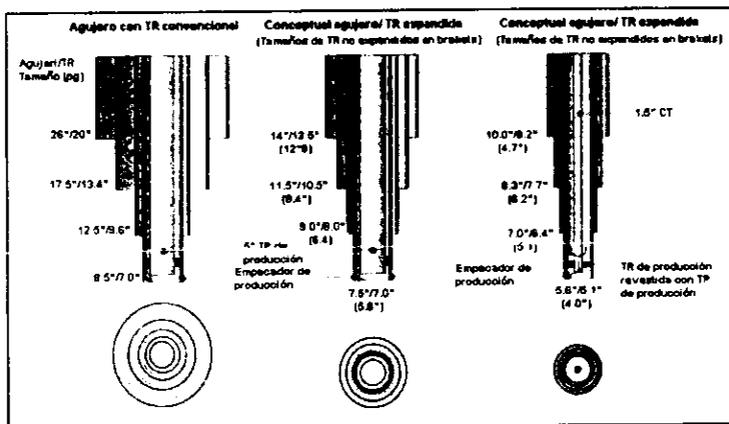


Figura 4.2 Comparación de un diseño de pozo convencional contra pozos que usan tuberías expandibles, con la misma capacidad de producción.

Con la tecnología de tubería expandible se proporciona una extensión inferior adicional de liner entre las dos sartas de tubería de revestimiento, cambiando el programa de tubería de revestimiento para el pozo, sin disminuir el tamaño del agujero ni sacrificar objetivos productores.

BENEFICIOS EN LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN

El uso de la tubería expandible puede permitir mayor gasto de producción por pozo, lo que podría resultar en menos pozos perforados y en ahorros de tiempos de operación. Esto es debido a que en pozos con tubería de revestimiento convencional se tendría un menor diámetro en el objetivo, por requerirse un mayor número de sartas que en aquellos en los que se aplicara la tecnología expandible, ya que con esta última se requerirían menos sartas para el mismo objetivo. Esta última idea tiene en el fondo algo de falacia, ya que realmente con la tecnología expandible se utilizan igual o mayor número de sartas, sólo que al expandirlas proporciona un estado mecánico final con un menor número aparente de sartas.

La idea principal de lo descrito anteriormente, es que con tubería expandible se llegará al objetivo del pozo con un diámetro mayor que el alcanzado con tubería convencional.

La combinación de iniciar la perforación con menores diámetros de agujero y el mantener mayor capacidad de producción del pozo, permite reducir el tiempo de equipo y mejorar la economía del proyecto que en conjunto es posible con la tecnología expandible.

Al mismo tiempo, al iniciar con menores diámetros de agujero, se reducirán también el tamaño del equipo, las áreas destinadas a la tubería y al equipo auxiliar, los cuales se podrán manejar con mayor facilidad.

La aplicación descrita anteriormente corresponde prácticamente al uso de la tecnología de perforación de pozos de diámetro reducido, con la cual mejora la velocidad de penetración, disminuye el volumen manejado de fluidos de perforación y control y se optimiza la operación del equipo de control de sólidos, entre otras ventajas, con un resultado de una reducción significativa en el costo de pozo, tal y como se reporta ampliamente en la literatura.

Se planea implementar a futuro esta tubería expandible en los diseños de pozos en territorio nacional para mantener un mayor diámetro de agujero que puede ser aprovechado para futuras reentradas, reduciendo costos de mantenimiento durante la vida productiva del pozo.

4.3 BENEFICIOS ECONÓMICOS DE LA TECNOLOGÍA EXPANDIBLE

De los sistemas descritos en el Capítulo 3, sólo se cuenta con información de costos del Sistema Ranurado de Malla Expandible (*Expandable Slotted Screen System*) y Sistema de Tubería de Revestimiento Corta Expandible Alternativa (*Alternative Borehole System*), por lo que únicamente se podrá hacer el análisis de estos sistemas. Sin embargo, el análisis de los sistemas restantes se hará considerando costos relativos de uno con respecto a los otros.

De pláticas con representantes de las compañías en México, se comentó que los costos de tubería sólida expandible serán dados a conocer a mediados del año 2002.

La Figura 4.3 muestra los beneficios de costos relativos para un pozo convencional y el Sistema Ranurado de Malla Expandible programado y real, durante la perforación, con análisis económicos realizados en Estados Unidos.

La perforación terminó dos días antes de lo programado, a pesar de numerosos problemas. Los costos estimados del pozo al final de la perforación fueron de \$5.34 millones de dólares contra \$6.922 millones programados, mientras que el costo estimado del pozo convencional fue de \$7.572 millones.

Los ahorros reales obtenidos en costos con el uso de esta tecnología fueron del 23% con respecto al pozo programado y del 30% con respecto al pozo convencional.

En un análisis de estos valores se puede observar lo siguiente. Considerando que la tecnología expandible se encuentra en la etapa inicial de desarrollo y aún en la etapa de investigación aplicada, se espera, según lo visto al inicio de este capítulo, que el costo de cualquier tecnología en estas primeras etapas deba de ser elevado. También se espera que al paso del tiempo y después de los resultados de la aplicación de las investigaciones realizadas y de la innovación de la tecnología, dicho costo deba a seguir una tendencia a abatirse.

Si ya de por sí la sola aplicación de la tecnología expandible refleja ahorros de aproximadamente el 8% con respecto a la tecnología convencional, las expectativas son entonces que dichos costos se abatan con el curso de las investigaciones y desarrollos tecnológicos. Es decir, los ahorros deberán de ser aún mayores.

Por otro lado, el resultado real de la perforación del pozo con tecnología expandible refleja un ahorro del 23% con respecto a lo programado, por lo que sería de esperarse que los ahorros posiblemente fueran mayores al paso de las

siguientes investigaciones y desarrollos tecnológicos. Esto podría discutirse considerando que dichos ahorros no tendrían porque aumentar con estos resultados de investigación y desarrollo tecnológico. En el peor de los casos el rango del porcentaje de ahorros deberá mantenerse. Reconsiderando los conceptos de optimización, se estaría en condiciones de forzar dicho aumento en los ahorros.

Finalmente, lo que si puede resultar con mayores expectativas, es el aumento en el porcentaje del ahorro de la aplicación de la tecnología expandible con respecto a la tecnología convencional. Es decir, el rango del 30% deberá ser mayor aún.

Esto termina por alentar los trabajos de investigación y desarrollo a un nivel que a todas luces realza la utilidad en la aplicación de la tecnología expandible, aunado al hecho de que ha venido a resolver los numerosos problemas operativos y de diseño descritos en e Capítulo 3.

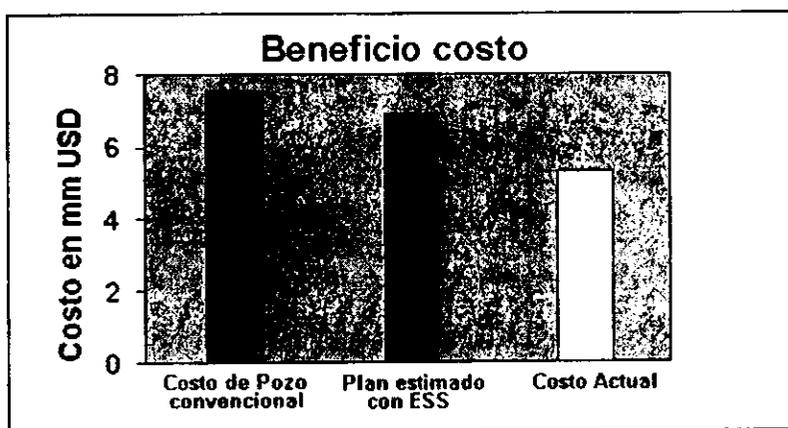


Figura 4.3 Beneficios de costos relativos para un pozo convencional y el Sistema Ranurado de Malla Expandible.

4.3.1 COMPARACIÓN DEL COSTO DE LA TECNOLOGÍA

En una reciente adquisición de Petróleos Mexicanos, se pudo realizar la comparación relativa de costos entre la tubería expandible ranurada (Sistema de Tubería de Revestimiento Corta Expandible Alternativa, *Alternative Borohole System*) y la tubería de revestimiento convencional.

De acuerdo con los datos proporcionados por Pemex, mientras que el costo de la tubería convencional es X , el costo del Sistema de tubería de revestimiento corta

expandible alternativa (ABL) es $1.89 X$. Este costo de $1.89 X$ a simple vista no parece muy atractivo. De hecho, hasta se podría pensar que es excesivo. Pero si se toman en cuenta los beneficios y ahorros que se pueden lograr, esto ya resulta atractivo. La Figura 4.4 muestra una gráfica con los valores comparativos del costo de ambas tuberías. Se consideró X debido a que es más representativo porque los costos pueden variar y quedarían al representarlos fuera de la gráfica y esta quedaría sin cumplir su función para lo cual fue realizada.

Por otro lado, las condiciones técnicas en las que se realiza la comparación económica es la consideración de que se tiene programada la intervención de un pozo, en el que se han calculado los costos totales de operación. Es decir, para hacer la comparación, se realizaron los cálculos de los costos en los que se incurriría si se interviniera el pozo con tubería de revestimiento convencional y con tubería expandible.

En dichos casos, se considera eliminar una sarta de contingencia para garantizar el diámetro de la siguiente etapa, que en este caso es la de $9\ 5/8''$, según se ve más adelante, para el pozo XX.

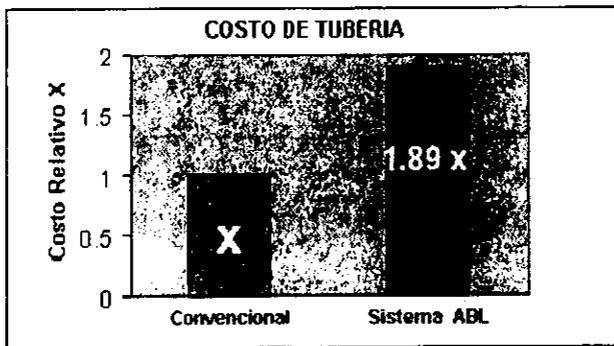


Figura 4.4 Comparación del costo de la tubería convencional y el Sistema de Tubería de Revestimiento Corta Expandible Alternativa, ABL.

El costo relativo final de la intervención, utilizando tecnología convencional, es de Y unidades, mientras que el costo relativo final utilizando la tecnología del Sistema ABL se abate hasta $0.508 Y$ unidades. La diferencia en el costo relativo final entre ambas tecnologías es bastante marcada, como se muestra en la Figura 4.5.

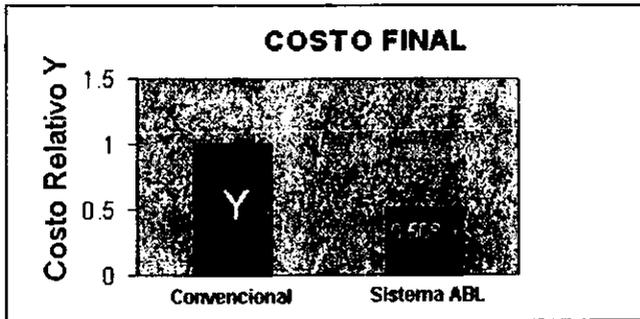


Figura 4.5 Costo final de tecnología convencional y el Sistema ABL.

Nota. Estos resultados son para el caso específico del Pozo XX. Sin embargo, según se vio anteriormente, se estima una reducción aproximada del 30% en el costo, con respecto al costo total de la operación.

BENEFICIOS ECONÓMICOS EN EL SISTEMA DE TUBERÍA DE REVESTIMIENTO CORTA DE PERFORACIÓN EXPANDIBLE PARA AGUJERO DESCUBIERTO

Con la utilización del Sistema de Tubería de Revestimiento corta de Perforación Expandible para Agujero Descubierta (*Expandable Openhole Drill Liner, EODL*) se puede evitar el uso de sartas intermedias de tubería de revestimiento corta para continuar la perforación con etapas posteriores hasta alcanzar el objetivo. Esto es lo que se conoce como evitar sacrificar un diámetro de tubería de revestimiento intermedia. De este modo, el presupuesto para pozos marinos de \$30 o \$40 millones de dólares es ficticio.

BENEFICIOS ECONÓMICOS EN EL SISTEMA COLGADOR EXPANDIBLE DE TUBERÍA CORTA

Por otro lado, con el uso del Sistema Colgador Expandible de Tubería Corta (*Expandable Liner Hanger, ELH*) se elimina la necesidad de la cementación forzada del liner superior. De la misma manera, se obtienen condiciones de hermeticidad en el espacio anular, tanto durante la colocación de la tubería, como a lo largo de la vida del colgador, teniendo ahorros substanciales comparándolos con la tecnología convencional.

4.4 ANÁLISIS ECONÓMICO

Para visualizar mejor estos beneficios y ahorros, Petróleos Mexicanos, a través de la Unidad de Perforación y Mantenimiento de Pozos División Marina, planteó un ejemplo con datos reales, en el que se compararon tanto la tecnología convencional, como la tecnología expandible. Específicamente, se obtuvieron datos del pozo XX de la plataforma YY (de PEMEX), y los resultados permitieron establecer los siguientes puntos.

- ✓ Estado mecánico.
- ✓ Análisis del tiempo de operación.
- ✓ Resultados finales.
- ✓ Necesidades tecnológicas.
- ✓ Alcances del proyecto.
- ✓ Riesgos o consecuencias.

ESTADO MECÁNICO

Los resultados finales mostraron que el asentamiento de la tubería de revestimiento intermedia de 11 7/8" quedó en la formación Oligoceno Inferior (Lutitas), (por ausencia de Paleoceno), y a solo 176 metros de la zapata de 9 5/8" en Cretácico Medio, para cubrir la sección correspondiente a la Brecha (Cretácico Superior).

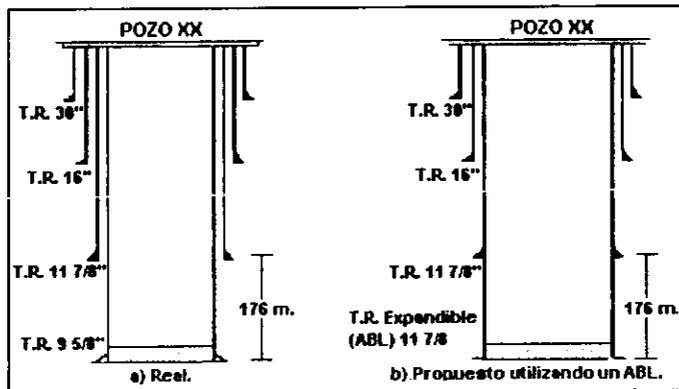


Figura 4.6 Estado mecánico.

PROBLEMAS ENCONTRADOS

La presencia incidental de alteraciones en la columna geológica, o por zonas de inestabilidad fisicoquímica intercaladas en la zona del yacimiento genera en primera instancia la introducción y cementación de una tubería de revestimiento a una profundidad no programada causando un impacto negativo en el costo del pozo debido a operaciones adicionales por problemas tales como, pérdida de fluidos de control, generación de accidentes mecánicos y trabajos de desviación de pozo, además del costo adicional de la sarta, etc.

El problema más fuerte sería no obtener el diámetro mínimo requerido para aprovechar el potencial de producción estimado.

SOLUCIÓN AL PROBLEMA

Analizando las condiciones actuales del pozo y analizando también las aplicaciones de las tuberías de revestimiento expandibles ranuradas, ya que con esta no se tendría pérdida de tamaño de agujero, se llegó a la solución de proponer a este problema el Sistema de Tubería de Revestimiento Corta Expandible Alternativa (*Alternative Borehole Liner System*):

ANÁLISIS DE LOS TIEMPOS DE OPERACIÓN

Para poder apreciar la conveniencia del uso de estas tuberías, se hizo un análisis económico, ilustrado en la Tabla 4.1, donde se plantean los tiempos de operación y costos del pozo XX de la plataforma YY, típico para ese arreglo de tuberías.

Estos problemas encontrados fueron reales así como sus tiempos, así mismo se observa que el tiempo utilizado en problemas fue mayor al de la operación normal.

Como puede observarse en la Tabla 4.1, los montos mostrados corresponden exclusivamente a costos por concepto de tiempos de operación de equipo por día.

Por otro lado, en la Tabla 4.2, se considera el uso de tubería expandible, eliminando los problemas que se ocasionan sin la utilización de esta tubería, así mismo se redujo el costo de tiempos de operación y por ende el costo total de la operación.

Tabla 4.1 Costos por concepto de tiempos de operación del pozo XX de la plataforma YY con tecnología convencional.

OPERACIÓN	TIEMPOS DE OPERACIÓN, HR	
	NORMAL	CON PROBLEMAS
1. Probando conjunto de preventores	8.5	
2. Registros	35.0	
3. Liner	77.0	
4. Perforación (pérdidas de circulación, sarta atrapada, etc.)	55.5	
5. Viajes	27.5	
6. Reparación de equipo	89.0	
7. Esperas		228.5
8. Controlando pérdida		226.5
9. Despegando tubería		154.0
10. Acondicionamiento para T.R. de 9 5/8"	14.0	
11. Tapón de cemento por accidente mecánico		185.0
Total de horas	1101.0	794.0
Total de días	45.9	33.1
COSTOS DE PLATAFORMA, USD	\$ 483,026.00	\$ 1,249,260.00
COSTO TOTAL DE PLATAFORMA, USD	\$ 1,732,286.00	

- Costo/Día de la Plataforma YY: \$37,761.00 dólares

Como puede observarse en la Tabla 4.2, los montos mostrados corresponden exclusivamente a costos por concepto de tiempos de operación de equipo de plataforma por día.

De las Tablas 4.1 y 4.2 se observa que la opción de usar tubería expandible, para el pozo en estudio resulta en un ahorro del 34.29 % del costo de la plataforma con respecto al costo del pozo convencional.

Tabla 4.2 Costos por conceptos de operación del pozo XX de la Plataforma YY utilizando tubería expandible ranurada (ABL).

OPERACIÓN	TIEMPOS DE OPERACIÓN, HR	
	NORMAL	USANDO T.R. EXPANDIBLES
1. Probando conjunto de preventores	8.5	
2. Registros	35.0	
3. Liner	77.0	
4. Perforación (pérdidas de circulación, sarta atrapada, etc.)	55.5	
5. Viajes	27.5	
6. Reparación de equipo	89.0	
7. Ampliando (176 m)		44.0
8. Registro de geometría		12.0
9. Introducción de T. R. Expandible		12.0
10. Cementando y expandiendo T. R.		5.0
11. Imprevistos		12.0
Total de horas	377.5	85.0
Total de días	15.7	3.5
COSTOS DE PLATAFORMA, USD	\$ 460,212.00	\$ 133,737.00
COSTO TOTAL DE PLATAFORMA, USD	\$ 593,948.00	

RESULTADOS FINALES

En la Tabla 4.3, se resumen los costos de la tubería de revestimiento convencional y la tubería expandible. Aún cuando el costo de la tubería expandible es mayor que el de la tubería convencional, se puede establecer un balance general favorable para la tubería propuesta.

Cabe hacer notar que este ahorro se obtuvo únicamente para este problema y condiciones específicas y variará dependiendo del mismo. Asimismo, resulta atractivo el ahorro que se obtuvo al aplicar tubería expandible ranurada ya que este fue de casi \$1,000,000.00 de dólares.

En la Tabla 4.3 se muestran los costos de tubería de revestimiento expandible de manera global. A continuación se muestran los costos de tubería de revestimiento de manera desglosada, actualizados al 17 de febrero de 2000.

Tabla 4.3 Comparación de costos de operación utilizando tecnología convencional y tubería expandible.

DESCRIPCIÓN	COSTOS DE OPERACIÓN, USD	
	CONVENCIONAL	USANDO T.R. EXPANDIBLES
Costo de la T.R. 9 5/8", incluye colgador y accesorios	\$ 206,262.00	
Costo de la T.R. Expandible y accesorios (incluye el servicio de ampliar agujero)		\$ 390,000.00
Costo por equipo (Tablas 4.1 y 4.2)	\$1,732,286.0	\$ 593,949.00
TOTAL	\$ 1,938,548.00	\$ 983,949.00
AHORRO USD	\$ 954,599.00	

Tabla 4.4 Costos desglosados de la tubería expandible ranurada.

Cantidad	Descripción	Costo por unidad	Total costo
18	Junta ABL 8 5/8" (NOM 40 pies de longitud)	\$12,696.33	\$228,534.00
3	Conector superficial 8 5/8" (agujero descubierto 80k)	\$12,854.00	\$38,562.00
2	Conector de fondo 8 5/8"	\$8,081.00	\$16,162.00
2	Zapata ABL 8 5/8"	\$8,189.00	\$16,378.00
17	Centrador expandible 8 5/8"	\$188.00	\$3,196.00
	USD	Subtotal	\$302,832.00
	Flete USD \$1,000.00		
	Seguro \$2,142.00		
	Ampliación de agujero \$84,026.00		
	USD Valor Total		\$390,000.00

Peso neto de la tubería 11,000 Kgs.

NECESIDADES TECNOLÓGICAS

Se requiere evitar utilizar tubería de revestimiento de contingencia y modificar el estado mecánico del pozo, así mismo evitar el impacto negativo en el costo del pozo.

Es necesario tener la tecnología de vanguardia para poder enfrentar los retos que se presentan durante la perforación o intervención de un pozo, que tenga como resultado que la industria petrolera mexicana se vuelva más rentable y pueda competir como empresa y seguir siendo una de las mejores en el mundo, ya que se tiene pensado en el caso de la Unidad de Perforación y Mantenimiento de Pozos Región Marina que esta se incorpore a las licitaciones de perforación, compitiendo con las mejores compañías en el mundo en su ramo.

ALCANCES DEL PROYECTO

Este proyecto de implementar nueva tecnología como la expandible es de alcance general para todo PEP, y sobre todo en los pozos productores del campo Cantarell, donde el alto índice de productividad del yacimiento requiere de pozos de diámetros grandes.

En un futuro se podrá implementar este tipo de tecnología a diferentes áreas del territorio nacional incluyendo pozos en tierra.

Si no se realiza el proyecto se continuarán generando altos costos debido a operaciones adicionales como es el sacrificio de alguna tubería de revestimiento en menoscabo de la producción óptima para cada pozo.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Este trabajo pretendió establecer el estado del arte de la tecnología de tuberías de revestimiento expandibles, marcando sus ventajas y desventajas, además de generar la suficiente inquietud para no pasarla por alto ya que actualmente en México pocas personas relacionadas con la industria petrolera conocen del tema. Es decir, no hablo de personas que están familiarizadas con el tema como lo es el personal de la Unidad de Perforación y Mantenimiento de Pozos de la Región Marina, si no de personas que apenas se están introduciendo en dicho tema, esperando que este trabajo les ayude a resolver alguna duda.

Se mostraron ejemplos realizados con tecnología de tubería expandible en los diferentes países, lo que reafirma las ventajas que se tiene con esta tecnología en comparación con la tecnología convencional.

El objetivo principal de esta tubería es mantener el tamaño de agujero, con un mínimo telescopiado de pozo, lo que conlleva a que se refleje en los costos mientras se tendrán que utilizar equipos pequeños, debido a que se podrá comenzar con una tubería de 17" y no la de 30" en los pozos convencionales como lo concluyen los autores de la información analizada.

Es importante que después de expandir la tubería de revestimiento se corra un registro UBI (Unidad de Imagen de Agujero) para poder tener toda la certeza de que la tubería fue correctamente expandida y que no se tengan problemas posteriores.

Con esta herramienta se podrá dar nueva vida a pozos viejos que anteriormente no eran rentables, ya que no se necesitará el uso de una nueva sarta de revestimiento desde la superficie ya que se podrán reparar tuberías de revestimiento dañadas.

Un punto importante es el costo, ya que cuando se analiza la tubería resulta de mayor costo que la convencional, casi el 90%, pero al obtener el costo final de toda la operación resulta una reducción en el costo debido a que los tiempos de operación se reducen, lo mismo que el volumen de fluido de perforación, entre otros.

Los costos se verán reducidos en un 30% dependiendo del pozo o campo en cuestión y los diversos problemas que se encuentren, así como la situación geológica, condición geográfica y tirante de agua.

En el futuro se podrá utilizar la tecnología de tubería expandible para operaciones en tierra ya que se adquirirá mayor experiencia y la oferta de dicho producto bajará los costos.

La tubería expandible se podrá utilizar en pozos verticales y horizontales debido a que no existen restricciones para ser utilizada en uno en particular, ya que su aplicación únicamente dependerá del correcto diseño y reto que se tenga.

Por otro lado, las propiedades de la tubería antes y después de la expansión todavía se siguen investigando para que en poco tiempo no exista ninguna duda al respecto y se tenga completa confiabilidad en las operaciones.

Otro punto importante es que trabajos como éste, donde el aporte hacia la Universidad y la Industria Petrolera Mexicana van vinculados, se vean cada vez con mayor frecuencia, así como también sería excelente que se motivara más a los futuros profesionistas.

Con el análisis de la información utilizada en el presente trabajo, se llega a la conclusión de que esta tubería es apta para poderla aplicar en zonas como la Región Marina, ya que el dispositivo ya ha sido probado en ambientes severos como el Mar del Norte donde los tirantes de agua son mayores y las condiciones geológicas son más drásticas. Debido a esto, en un ambiente menos severo como es la Bahía de Campeche se reafirma la factibilidad de aplicarla.

Pemex ya ha visto esta tecnología, y cuenta con un lote de tubería del tipo expandible ranurada para agujero descubierto (ABL) que fue analizada en el trabajo. Todavía no se ha utilizado, pero en la medida que se utilice se observarán los beneficios. Con esto se reafirma que la industria petrolera mexicana está buscando nuevas alternativas para solución de los diferentes problemas encontrados en la zona marina y con ello se marca una nueva etapa para enfrentar los nuevos retos, ya que si esto se sigue promoviendo México no quedara alejado de las nuevas tecnologías a nivel internacional.

Se espera que en un futuro proyectos como Cantarell se vean beneficiados con la tecnología, ya que en el último año se descubrió un yacimiento debajo de esta zona y la tecnología encaja bien en estos proyectos. Así también se espera que se visualice el poderla implementar en más campos así como también en los pozos del Activo Litoral Tabasco.

Si se difunde el presente trabajo, cuando las compañías ofrezcan su producto (de tubería expandible) se podrá tener un mejor entendimiento y un criterio más amplio para rechazar o aceptar dicho producto para resolver problemas específicos que se presenten. Así también los trabajos de tubería expandible se apoyan en los servicios proporcionados por las compañías.

Al ingeniero de diseño le concierne la selección de la tubería de revestimiento adecuada así como el poder implementar la tubería expandible analizando sus beneficios, ya que la disponibilidad de una buena tecnología no produce automáticamente una utilidad. El puente necesario entre la tecnología y la utilidad es el profesionalismo con el cual se utiliza esta.

Nuestro país tiene el reto de lograr perforar alrededor de los 400 metros de tirante de agua, es aquí donde la tubería expandible puede aplicarse debido a que se enfrentarán a zonas desconocidas donde cualquier eventualidad se podría presentar y necesitaríamos herramientas capaces de poder alcanzar dichos retos.

México tiene un gran potencial petrolero en el mar, no solamente en áreas donde tradicionalmente ha operado y que se localizan en tirantes menores de 100 metros, si no que el potencial se extiende a tirantes mayores de 200 metros. Debido a ello deberá prepararse técnicamente para perforar, desarrollar y explotar estructuras petroleras que pudieran ser descubiertas en aguas profundas (como el yacimiento que se encuentra localizado en el Golfo de México y que México comparte con Estados Unidos, Las Donas), y le será de gran utilidad la tubería expandible.

El título del trabajo es por que se parte de una tecnología de aguas profundas para poder aplicarla en México. Esta tecnología será de gran utilidad a Pemex ya que no importa que no se tenga un gran tirante de agua, lo que importa es que las operaciones tengan éxito pese a los altos costos que pudieran ocasionar.

No existe ninguna restricción para no aplicar la tecnología de aguas profundas en aguas que no lo son, sin embargo, el conocerlas resulta de gran ayuda ya que se podrá tener mayor conocimiento de esta.

Se espera haber ilustrado al lector y haber cumplido los objetivos planeados que fueron: establecer el estado del arte de la tecnología de tubería expandible, tener un manual en español y ver la factibilidad de poderla aplicar en territorio nacional. Todo esto fue el resultado de la poca información encontrada y si no se tocó algún punto es debido a que las compañías no dan a conocer toda su información, solo en el caso de los costos se obtuvo información a través de Petróleos Mexicanos ya que estos costos se darán a conocer en el año 2002, estando un paso adelante para comenzar a hacer propuestas concretas y seguir trabajando en beneficio del país.

5.2 RECOMENDACIONES

De acuerdo al estado del arte de la tecnología de tubería expandible y de las conclusiones anteriores, se pueden hacer las siguientes recomendaciones.

Puede ser aplicada en territorio nacional, pero se requiere un estudio minucioso de las condiciones y el diseño para ver la factibilidad del pozo o campo donde se desee utilizar para que no se tenga inconvenientes por mala selección del dispositivo.

Es necesario que Pemex capacite a sus especialistas para aplicar la tecnología de tubería expandible y así tener un mayor control en los diseños y operaciones ya que las compañías traen a su personal capacitado pero se tiene que supervisar.

De igual modo se tiene que analizar mas a fondo esta tubería para poder pensar en aplicarla en áreas del territorio nacional, como es la Sonda de Campeche y el Litoral de Tabasco, ya que promete grandes beneficios.

Petróleos Mexicanos deberá contar con nuevas herramientas, capaces de lograr nuevos retos, bajar costos y riesgos de operación debido a que las actividades exploratorias en México indican una tendencia cada vez más alejada de la costa y por consiguiente a una mayor profundidad, y que en la medida de lo posible se tome en cuenta las ventajas de tubería expandible.

En el aspecto técnico se tienen las siguientes recomendaciones:

Todos los programas de instalación deberán de cumplirse estrictamente, ya que el mínimo descuido repercutirá en la operación, así como el correcto uso de los mismos.

La tubería expandible seleccionada deberá desarrollar alta resistencia a la compresión, proporcionando estabilidad mecánica e integridad hidráulica para resistir los diferenciales de presión.

Es necesario utilizar el elastómero en el caso de tubería sólida expandible evitando ovalidad e incrementando la resistencia hidráulica, ya que cuando se utiliza un elastómero en el caso de la tubería expandible sólida la tubería resulta con mayor ventaja que si no se hubiera.

El diseño con la tubería expandible deberá desarrollar alta resistencia a la compresión, proporcionando estabilidad mecánica e integridad hidráulica para resistir los diferenciales de presión.

La lechada de cemento debe ser la adecuada, ya que la tubería será expandida antes de que fragüe esta.

Es importante realizar el pedido de la tubería con anticipación para proporcionar a la compañía las especificaciones requeridas a fin de que para la fecha de utilización se cuente con ésta.

Después de cada operación de expansión de tubería se deberá correr el registro UBI, antes de seguir con la operación buscando verificar el éxito de la cementación en el pozo.

Se deberá emplear el personal altamente capacitado, puesto que los costos se verán beneficiados por ello y no se presentarán pérdidas por mala utilización de la tecnología que es lo que se pretende.

Se tendrá que hacer énfasis en la investigación acerca de los elementos que se requieren para diseñar lechadas de baja densidad en la cementación de aguas profundas.

Utilizar lechadas de cemento con tiempos de transición largos que permitan expandir la tubería antes de que fragüe.

Todas las tuberías de revestimiento, liners y traslapes deberán ser examinados y probados (salvo la tubería conductora) después de haber sido cementados para continuar perforando y para que no se tenga ningún problema cuando se introduzca la tubería expandible.

Resultaría de gran utilidad presentar resultados de utilización de tubería expandible anteriores de una manera clara y práctica, de tal manera que sirva a las necesidades y requisitos técnicos de los usuarios para trabajos futuros.

Será necesario mantener interacción directa con las compañías con el fin de conocer las nuevas herramientas y equipos planeados para la utilización de tubería expandible, ya que esto facilitaría el trabajo.

La principal recomendación, es no pasar por alto este trabajo y ampliar más la investigación sobre esta tecnología, conforme las innovaciones tecnológicas se van presentando y ver el avance que tiene.

Así se sugiere seguir aportando ideas, propuestas, herramientas, software, técnicas, etc., todo para lograr solucionar una amplia gama de problemas que aún se presentan en aguas profundas, con el objetivo de lograr óptimos resultados y no generar más errores, que resultan en pérdidas de tiempo y dinero.

BIBLIOGRAFÍA

1. Reinforced fiber cement casing first step in single ID
Le Blanc, Leonard.
Offshore, Noviembre 1996, Vol. 56, Pág. 28.
2. Reeled expandable casing creates single diameter well.
Le Blanc, Leonard
Offshore, Mayo 1997, Vol. 57, Pág. 32.
3. Shell, Halliburton team on expandable casing
Offshore, Julio 1998, Vol. 58, Pág. 22.
4. Expandable solid casing reduces telescope effect.
William Furlow, Technology Editor
Offshore, Agosto 1998, Vol. 58 No. 8, Pág. 102-103.
5. Drill liner, cladding, liner hanger developed from casing expansion.
William Furlow, Technology Editor
Offshore, Mayo 1999, Vol. 59 No. 5, Pág. 84.
6. Using expandable sand screen in unconsolidated formations
Kevin Mc Milin
Offshore, Enero 2000, Pág. 129.
7. Expandable casing program helps operator hit TD with larger tubulars
William Furlow
Offshore, Enero 2000, Pág. 48.
8. Oil field requirements: brains, brawn and adventurous spirit.
J. John Grow, Engineering Editor
World Oil, Septiembre 1998, Vol. 219 No. 9, Págs. 27-28.
9. Taylor made rigs, expandable-casing and CT drilling in the GOM.
J. John Grow, Engineering Editor
World Oil, Abril 1999, Vol. 220, Pág. 31.
10. How in situ expansion affects casing and tubing properties
R.D. Mack, Shell E&P Technology Co. Houston; Terry Mac Coy, Halliburton
Energy Services; Duncan Oklahuma and Lev Ring, Enventure Global
Technology, Houston. World Oil, Julio 1999.
11. Expandable tubulars
Journal Petroleum Technology
Mayo 1999, Pág. 22.

12. Expandable tubular solutions
Journal Petroleum Technology
Mayo 2000, Pág. 47.
13. Expandable tube is novel tool for difficult completions, drilling.
Daljit S. Gill, Wim C.M. Lohbeck, R. Bruce Stewart, Shell International Exploration & Production B.V., The Hague.
Oil & Gas Journal June 3 1996, Vol. 94 #23, Págs. 37-40.
14. Perspectivas para la industria del petróleo y gas costafuera de Latinoamérica
Tony Mackay Director General, Mackay Consultants, Houston, E. U.
Oil & Gas Journal Revista Latinoamericana Mayo/Junio 1998, Vol. 4 No. 3.
15. Expandable screen offers new option for sand control
Oil & Gas Journal
Noviembre 23, 1998, Vol. 96, No. 47, Pág. 60.
16. Making hole, recent and soon to be unveiled advances in drilling technology will allow drillers to hit more pay, more cost effectively
Brian A. Toal. Oil and Gas Investor, Julio 1999, Vol. 19 #7.
17. Shell develops expandable well liner
Petroleum Economist
Julio 1996, Vol. 63 #7, Pág. 45.
18. An Expandable-Slotted-Tubing, Fiber-Cement Wellbore-Lining System
R.B. Stewart, SPE, Daljit S. Gill, * and Wim C.M. Lohbeck, Shell Intl. E&P B. V., and M. N. Baaijens, SPE, Shell U. K. E&P Ltd.
SPE Drilling & Completion, Septiembre de 1997, Vol. 12 #3, Págs. 163-137.
19. Shell's expandable tubulars promise to cut cost while increasing step out and well depths. Shell Technology ventures
Drilling contractor , Noviembre/Diciembre 1998.
20. Expandable Slotted tubes offer well design benefits
Paul Metcalfe, Petroline Wireline Services Ltd
Petroleum Engineer International Octubre 1996. Págs 60-63.
21. La tecnología y su problemática en México (Primera parte)
Dr. Guillermo Dominguez Vargas
Ingeniería Petrolera, Agosto 1998, Págs. 18-30.
22. La tecnología y su problemática en México (Segunda parte)
Dr. Guillermo Dominguez Vargas
Ingeniería Petrolera Semtiembre 1998, Págs. 18-27.

23. Meeting economic challenges of deepwater drilling with expandable tubulars technology. Richard C. Haut, Enventure Global Technology, USA; Qamar Sharif, Shell E&P Technology Company, USA. Deep Offshore Technology Conference, 1999.
24. The development of the first expandable sand screen
Paul Metcalfe & Calum Whitelaw, Petroline WellSystems Ltd. OTC 11032 Offshore Technology Conference held in Houston, Texas 3-6 May 1999.
25. Expandable tubulars solutions
Andrei Filippov, Robert Mack, Shell; Lance Cook, Patrick York, Lev Ring, Enventure Global Technology; Terry Mc Coy, Halliburton Energy Services. SPE 56500. Annual Technology Conference and Exhibition held in Houston, Texas 3-6 Octubre 1999.
26. Trial of an Expandable sand screen to replace internal gravel packing
Mark van Buren and Léon van den Broek, SPE, Petroleum Development Oman, Calum Whitelaw, Petroline WellSystems. SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference, held in Abu Dhabi, UAE, 8-10 November 1999.
27. Optimization of well economics by applications of expandable tubular technology. Oladele O. Owoeye (SPE), Leste. O. Aihevba (SPE), R. A. Hartmann and V.C. Ogoke (SPE) Shell Petroleum Development Company Nigeria. IADC/SPE 59142 Drilling Conference held in New Orleans Louisiana 23-25 February 2000.
28. Expandable liner hanger provides cost effective alternative solution
C. Lee Lohoefer and Ben Mathis, Unocal; David Brisco, Halliburton Energy Services; Kevin Waddell, Lev Ring, and Patrick York, Enventure Global Technology. IADC/SPE 59151. Drilling Conference held in New Orleans Louisiana 23-25 February 2000.
29. Apuntes de terminación y reparación de pozos
Ignacio Alfonso Cárdenas
Facultad de Ingeniería, UNAM
30. Manual Diseño de Tuberías de revestimiento y cementación
Miguel Angel Benitez Hernández
IMP 1983.
31. Expandable casing accesses remote reservoirs
www.haliburton.com/pei/pei-expandable.asp
32. About Expandable-Tubular Technology, Applications, Technology Testing, Specifications.
<http://enventureqt.com/tech.htm>

33. Shell and Halliburton agree to form company to develop and market Expandable Casing Technology
<http://haliburton.com/news/shell.htm>
34. Expandable Tubing support services
Aberdeen Drilling Consultants ADC
<Http://www.adc-engineering.com/expandab.htm>
35. EST technology – Petroline products
Petroline WellSystems
www.petroline.co.uk/product/est_ess.htm
36. Technology frontiers
Abril 1999 Vol. 1, No. 2.
<www.EnventureGT.com>
37. Expandable tubular technology
<www.EnventureGT.com>
38. Patente mundial Tubular Slotted Expandable
WO 97/21901 PCT/GB96/03026
39. Folleto de Petroline WellSystems.
40. La ciencia e ingeniería de los materiales.
Donal R. Askeland
Grupo Editorial Iberoamérica.
México 1990.