

12



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

CONSTRUCCION DE REENTRADAS CON
TUBERIA FLEXIBLE

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A N :
JOSE CARLOS GUDIÑO CARBALLO
YOLOXOCHITL OLVERA CORREA

ASESOR: M I JOSE MARTINEZ PEREZ



MEXICO, D. F.

MARZO 2001



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.



FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-374

SR. JOSE CARLOS GUDIÑO CARBALLO
Presente

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

CONSTRUCCION DE REENTRADAS CON TUBERIA FLEXIBLE

INTRODUCCION

- I BREVE HISTORIA DE LA TUBERIA FLEXIBLE
 - II COMPONENTES SUPERFICIALES Y SUBSUPERFICIALES DEL EQUIPO DE PERFORACION CON TUBERIA FLEXIBLE
 - III VIDA UTIL DE LA TUBERIA FLEXIBLE (FATIGA)
 - IV CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE PERFORACION CON TUBERIA FLEXIBLE
 - V CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE FLUIDOS E HIDRAULICA.
- CASO PRACTICO
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
ANEXO
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"

Cd Universitaria, D. F., a 28 de febrero de 2001

EL DIRECTOR

ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg



FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-375

SRITA. YOLOXOCHITL OLVERA CORREA
Presente

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

CONSTRUCCION DE REENTRADAS CON TUBERIA FLEXIBLE

- I INTRODUCCION**
- II BREVE HISTORIA DE LA TUBERIA FLEXIBLE**
- III COMPONENTES SUPERFICIALES Y SUBSUPERFICIALES DEL EQUIPO DE PERFORACION CON TUBERIA FLEXIBLE**
- IV VIDA UTIL DE LA TUBERIA FLEXIBLE (FATIGA)**
- V CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE PERFORACION CON TUBERIA FLEXIBLE**
- VI CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE FLUIDOS E HIDRAULICA. CASO PRACTICO**
- VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- VIII ANEXO**
- IX 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.

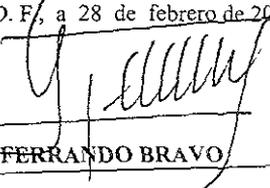
Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, D. F., a 28 de febrero de 2001

EL DIRECTOR



ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

“CONSTRUCCIÓN DE REENTRADAS CON TUBERÍA FLEXIBLE”

Tesis presentada por. Gudiño Carballo José Carlos 9226856 – 1

Olvera Correa Yoioxóchiti 9135970 – 6

Dirigida por: M. I. José Martínez Pérez

JURADO DEL EXAMEN PROFESIONAL:

PRESIDENTE: Dr. Daniel García Gavito

VOCAL: M. I. José Martínez Pérez

SECRETARIO: Ing. Salvador Macías Herrera

1^{er} SUPLENTE: Quím. Rosa de Jesús Hernández Álvarez

2^{do} SUPLENTE: Ing. Quím. Cristina Avilés Alcántara

Handwritten signatures of the jury members on a grid of lines. The signatures are: Daniel García Gavito, M. I. José Martínez Pérez, Salvador Macías Herrera, Rosa de Jesús Hernández Álvarez, and Cristina Avilés Alcántara.

México, D. F.; Marzo del 2001

A NUESTROS PADRES:

Porque nos han dado su amor y entregado su vida para darnos todo,
por su esfuerzo y dedicación a encaminarnos a la verdad y hacernos
personas de bien.

Por su confianza, comprensión y creer en el amor a Dios.

A MIS HERMANOS:

Como un estímulo para seguir adelante y ser mejores cada día.

Los quiere mucho:

Carlos y Yoloxóchitl

CAPÍTULO I

BREVE HISTORIA DE LA TUBERÍA FLEXIBLE ^{2, 1*}

La tubería flexible tuvo sus principios de aplicación durante la segunda guerra mundial, en un proyecto denominado "PLUTO" (Pipe Line Under the Ocean), el cual tenía como objetivo abastecer combustible a los aliados. Este proyecto consistió en tender una tubería en el fondo del Mar Mediterráneo, con la finalidad de no obstruir el paso a submarinos y que tuviera la capacidad de ser enrollada en carretes colocados en la superficie de las embarcaciones. El tubo fue construido de plomo con una cubierta de malla de acero para soportar los diferentes esfuerzos a los que estaría sometida.

A principios de 1960 se encontraron modernos diseños de cabeza inyectora para la tubería flexible, se desarrollaron sistemas para permitir que los submarinos desplegaran antenas de comunicación de radio en la superficie del océano mientras estos permanecían sumergidos.

La compañía "Bowen Tools" desarrolló un mecanismo denominado " A / NBra18A Sistema de Transferencia de Antena" ; el cuál podía desplegar una antena de latón encapsulada en polietileno de 5/8 pg de diámetro para profundidades de 600 pies. La antena fue almacenada en un carrete, abajo del inyector para un fácil despliegue o guardado de la misma.

En 1962 las Compañías "California Oil" y "Bowen Tools" desarrollaron el primer prototipo de " unidad de reparación con sarta ligera continua ", para el lavado de los tapones de arena en pozos de gas y aceite.

El primer carrete de tubería flexible a escala real, fue fabricado en tramos de 50 pies de 1.315 pg de diámetro externo "Columbium" de baja aleación, con una longitud total de 15000 pies.

Entre 1963 y 1964, ésta unidad fue probada en varios pozos en tierra y costa fuera al sur de Lousiana, desarrollando servicios de pesca y lavado de arenas.

En 1964, la compañía "Brown Oil Tool" y "Esso" introdujeron un sistema de inyección con tubería flexible para el servicio de pozos; que consistía en correr la

tubería alrededor de una polea ranurada fija y flexionada por los rodillos de la cadena, éstos rodillos se incorporaron en la silla de blocks para asegurar la tubería contra la polea; el mecanismo del inyector estaba apoyado en una unidad hidráulica portátil. Esta unidad fue construida para correr una tubería flexible de $\frac{3}{4}$ pg de diámetro y fue usada en varios servicios a pozos, incluyendo limpiezas alrededor del pozo; tanto en tierra como mar adentro.

En el año de 1967, la cabeza inyectora original de la compañía "Bowen Tools" se modificó para poder correr una tubería de $\frac{1}{2}$ pg y éste equipo se le rentó a la compañía NOWSCO, para que se relavaran pozos de desecho de agua salada utilizando Nitrógeno.

A principios de 1970, se hicieron varias modificaciones en las unidades de tubería flexible, incrementándose el diámetro de la tubería a 1 pg . De hecho, más de 200 unidades de tubería flexible fueron construidas para desempeñar servicios de limpieza de arenas e inyección de nitrógeno.

Desafortunadamente, los éxitos por los servicios desarrollados con tubería flexible fueron escasos y la reputación de una confiabilidad limitada provocaría que las mejoras en los equipos de tubería flexible detuvieran su desarrollo por varios años. A finales de 1970, surgieron fabricantes de equipos de tubería flexible tales como: "Uniflex. Inc.", "Hydra Rig Inc." y "Otis Engineering ", con diseños de cabezas inyectoras similares a las de la compañía Bowen Tools.

El diseño de la cabeza inyectora de la compañía "Uniflex" en 1975, ofreció mejoras en el sistema de cadenas y en el motor. El diseño de la cabeza inyectora, fue hecha por las compañías Bowen Tools, Hydra Rig Inc. y Otis Engineering. Estas modificaciones fueron exitosas para mejorar el desempeño y la confiabilidad del equipo en la superficie, reduciéndose significativamente los rangos de falla en el equipo.

La tubería flexible fue fabricada de acero del tipo HSLA con una resistencia a la cedencia de $70\ 000\ \text{lb/pg}^2$, con diámetros de $1\ \frac{1}{2}$ pg y $1\ \frac{3}{4}$ pg y con soldadura a tope. A finales de este año, se inició un proceso de soldadura al sesgo, mejorando notablemente la resistencia del acero y la vida de la tubería.

Para el año de 1983, comenzó la fabricación de láminas de acero de mayor longitud, reduciéndose el número de soldaduras, por lo que ahora existen sartas continuas de más de 30,000 pies de longitud.

En 1985, se desarrolló un nuevo tipo de cabeza inyectora de tubería flexible, el cuál era capaz de correr y soportar 8500 pies de TF de 3/4 pg. Posteriormente, se utilizaron tamaños de tubería flexible más grandes y así se pudo alcanzar mayores profundidades.

Para 1990, se aumentó el diámetro a 2 pg. Actualmente el diámetro más grande es de 4 ½ pg.

CAPÍTULO II

COMPONENTES SUPERFICIALES Y SUBSUPERFICIALES DEL EQUIPO DE TUBERÍA FLEXIBLE

II.1 TUBERÍA FLEXIBLE

Es aquella tubería continua que se almacena enrollada en un carrete, y se introduce o se extrae del pozo a través de la cabeza inyectora.

Las características principales de la tubería flexible en perforación son:

- La flexibilidad para podería enrollar y desenrollar en el carrete de operación y en el carrete de almacenamiento.
- Es una tubería de acero con soldadura continua.
- Los diámetros varían de $\frac{3}{4}$ " a $4 \frac{1}{2}$ " ; para perforación la más común es la de $2 \frac{7}{8}$ ".
- Baja aleación de acero al carbón.
 - ❖ ASTM A606 Tipo 4 modificado.
 - ❖ ASTM A607 modificado.
- Resistencia a la tensión, presión interna y presión al colapso (**Ver anexo**).

GENERALIDADES DEL EQUIPO DE TUBERÍA FLEXIBLE ^{1,2,4,1*}

Los equipos de tubería flexible por su diseño, tiene mayores ventajas económicas, como.

- a) Transporte rápido a pozos terrestres o marinos.
- b) No se pierde tiempo uniendo tramos de tubería para armar la sarta.
- c) No hay necesidad de desanclar o extraer el empacador.
- d) Instalación rápida.
- e) Puede operar sobre el árbol de válvulas de pozos en producción o sobre la mesa rotaria de equipos de perforación o reparación.

El desarrollo tecnológico de la tubería flexible ha permitido desarrollar varias aplicaciones como:

- Líneas de inyección a alta presión.
- Líneas de inyección de gas.
- Mantenimiento y control de pozos marinos.
- Líneas para limpieza.
- Equipos de muestreo.
- **Perforación con tubería flexible.**

II.2 COMPONENTES SUPERFICIALES DEL EQUIPO DE TUBERÍA FLEXIBLE ^{1,4,1*}

La unidad de tubería flexible es un equipo de fácil transporte e instalación en el pozo, la cual opera hidráulicamente.

El equipo de tubería flexible se monta en una plataforma portátil o camión, y al instalarse junto con equipo complementario se llama UNIDAD DE TUBERÍA FLEXIBLE; la cual permite introducir y sacar la tubería a grandes velocidades (200pies/ min) y presiones altas (5000 – 10000 lb/pg²).

Los componentes superficiales principales del equipo de tubería flexible son:
Unidad de potencia hidráulica.

- Carrete de la tubería.
- Cabina de control.
- Cabeza inyectora.
- Indicador de peso.
- Contador de la tubería.
- Equipo para el control del pozo.

UNIDAD DE POTENCIA

La unidad de potencia es una estructura la cual consta de: un motor diesel, bombas hidráulicas, tanque de aceite, y ésta alimenta al carrete, al inyector y la bomba de fluidos. También cuenta con un compresor para suministrar aire y operar los sistemas neumáticos de la unidad como: la bomba que acciona el estopero (stripper), el sistema de arranque del motor y lubricación de las cadenas de la cabeza inyectora. **Figura 2 – 1.**

El montaje de la unidad de potencia hidráulica varía de la siguiente forma:

- En el tractocamión de la unidad de TF.
- En una plataforma con fuente de potencia independiente.
- Integrada al mismo patín de la cabina de control.

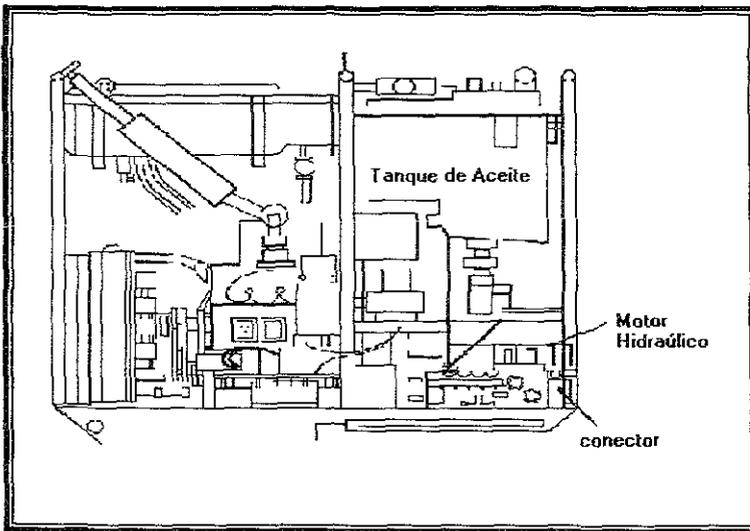


Figura 2 – 1 Unidad de potencia

CARRETE DE TUBERÍA

El carrete de la tubería flexible es fabricado de acero con un tambor que varía de 60 a 72 pg, con un reborde del carrete que tiene un diámetro que varía de 5 a 9 pies de diámetro, siendo el más común el de 6 pies, en éste se enrolla y almacena la tubería flexible.

Durante la introducción de la tubería flexible al pozo, una pequeña presión de empuje es mantenida o controlada por el motor del carrete para permitir que la cabeza inyectora jale la tubería flexible fuera del carrete y mantenga la tensión entre la cabeza inyectora y el carrete, cuando no se tiene motor en el carrete se tiene que jalar la tubería por medio de un cable y llevarla hacia la cabeza inyectora para que esta la introduzca al pozo. Cuando la tubería flexible es extraída del pozo, la presión en el motor del carrete se incrementa permitiendo la rotación del mismo, para mantener al inyector con el mismo rango de extracción de la tubería. **Figura 2 – 2.**

Los componentes principales del carrete son:

- Unión giratoria. Se localiza en el eje del carrete y cuenta con un juego de empaques que evitan la fuga del fluido durante la operación. Además permite bombear los fluidos a la sarta de perforación mientras esta girando el carrete.
- Guía de la tubería. La tubería flexible es guiada al enrollarse en el carrete por un mecanismo llamado " Conjunto de nivelar - enrollar ", para alinear apropiadamente la tubería flexible.

El conjunto de nivelar-enrollar cubre el ancho del carrete y puede ser levantado a la altura necesaria para alinear la tubería flexible

- Lubricador de tubería. Es un dispositivo que se encuentra sobre el carrete de la tubería flexible, el cual tiene la función de proporcionar una película de aceite a la tubería para su protección.
- Medidor de profundidad. Este mecanismo cuenta con una serie de ruedas que tienen contacto con la tubería flexible para poder medir el número de pies de tubería que se está introduciendo en el pozo. Y se puede observar desde la cabina de control.

- Freno del carrete. Es un sistema de seguridad que se activa para detener la rotación del tambor al romperse accidentalmente la tubería entre el carrete y la cabeza inyectora.

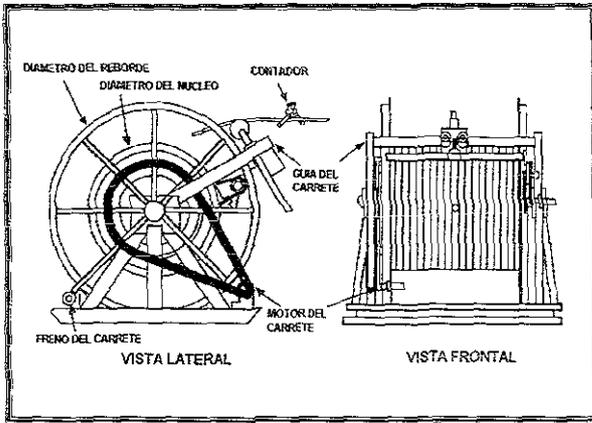


Figura 2 – 2 Carrete de la tubería flexible

Para el cálculo de la capacidad de tubería (Figura 2 – 3), se tienen las siguientes ecuaciones:

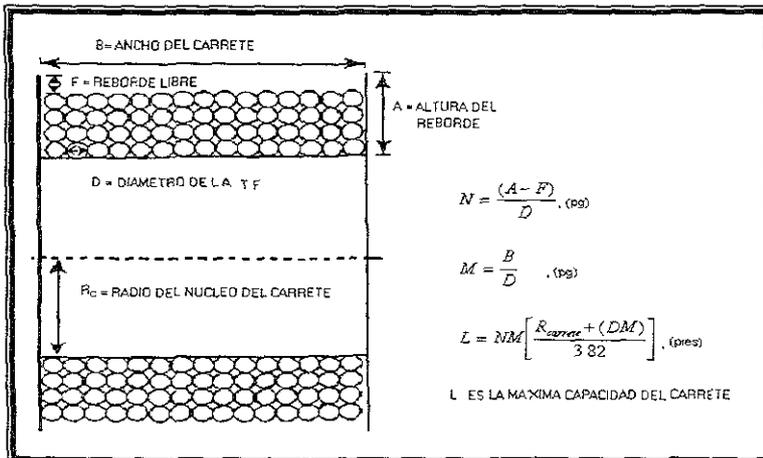


Figura 2 – 3 Capacidad del carrete

CABINA DE CONTROL

La cabina normalmente contiene medidores y los controles requeridos para operar y monitorear el equipo de la tubería flexible, esta montada en la unidad de tubería flexible, para que el operador tenga una mejor visibilidad de las operaciones que se estén realizando. **Figura 2 – 4.**

Los principales componentes del tablero de control son:

1. Manómetros para indicar la presión del pozo, presión de circulación, indicadores de tensión en las cadenas de la cabeza inyectora.
2. Indicadores de peso de la sarta de perforación.
3. Palanca de control de velocidad para introducir y sacar la tubería flexible.
4. Control del freno del carrete.
5. Válvulas y manómetros para mantener la presión adecuada al lubricador de la tubería.
6. Válvula del control para abrir o cerrar los arietes del conjunto de preventores.
7. Sistema de enrollado del carrete.
8. Control de la unidad de potencia y equipo electrónico.
9. Control de las bombas hidráulicas y las reservas de los fluidos. Estas se usan para controlar la tensión de la cadena y rodillos del inyector.



Figura 2 – 4 Cabina de control de la unidad de tubería flexible

CABEZA INYECTORA

Es el componente más importante de la unidad de la tubería flexible. **Figura 2- 5**

Está diseñada para desempeñar tres funciones básicas:

1. Proveer la confianza para introducir la tubería en contra de la presión del pozo o para vencer la fricción de las paredes.
2. Controlar el rango de entrada de la tubería con respecto a las condiciones del pozo.
3. Soportar el peso de la tubería suspendida y acelerar a velocidades operacionales cuando se extrae del pozo.

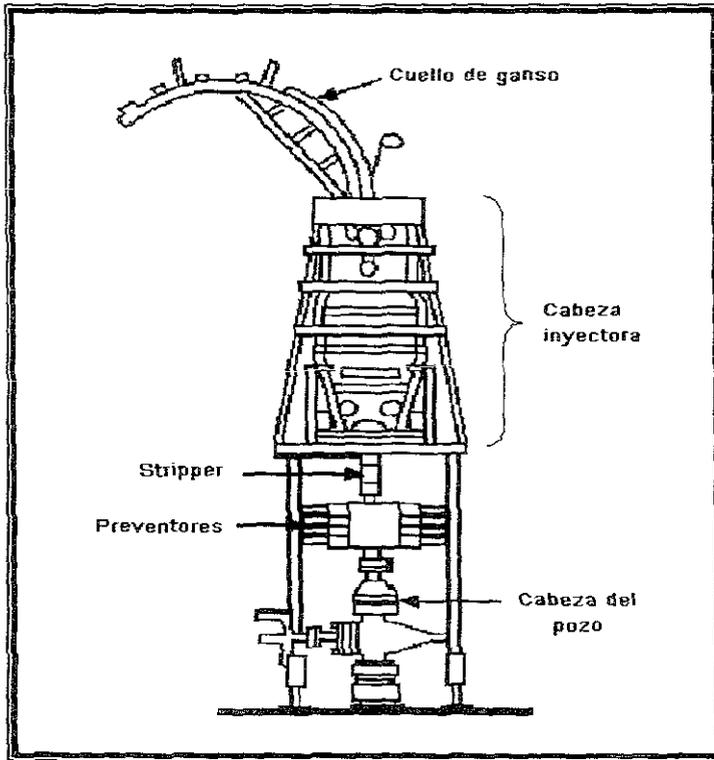


Figura 2 - 5 Cabeza inyectora

La cabeza inyectora consta de los siguientes componentes:

- ☑ Guía de la tubería
- ☑ Cadenas
- ☑ Motores hidráulicos
- ☑ Indicador de peso

GUÍA DE LA TUBERÍA ^{1*}

También se le conoce como cuello de ganso. Es un arco de acero equipado con un sistema de rodillos, el cual se monta sobre la cabeza inyectora. **Figura 2 – 6.**

Su función principal es servir como guía a la tubería flexible dirigiéndola del carrete a los blocks de cadena de la cabeza inyectora; proporcionando soporte, tensión y alineación de la tubería flexible.

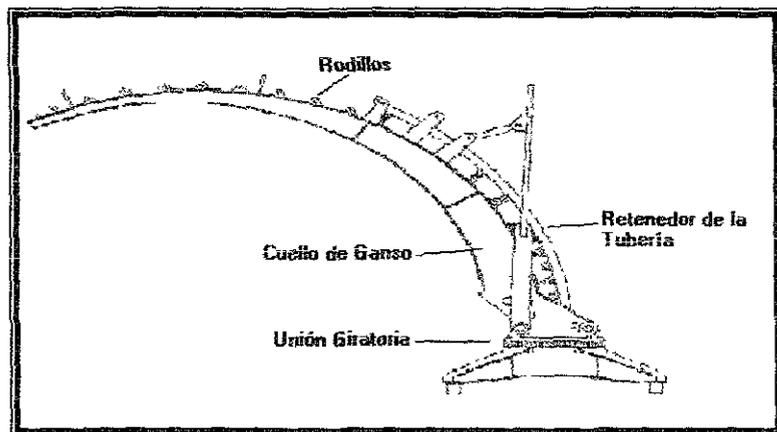


Figura 2 – 6 Guía de la tubería flexible

CADENAS ^{1*}

La función de las cadenas es transmitir la fuerza necesaria para introducir y sacar la tubería flexible en el pozo.

INDICADOR DE PESO ^{1*}

Se localiza en la base de la cabeza inyectora, éste nos proporciona el peso de la sarta de la tubería flexible soportada por las cadenas.

CONTADOR DE TUBERÍA 1"

El contador de tubería mide la longitud de la tubería utilizada. La rueda contadora tiene 2 pies de diámetro y está sometida contra la tubería mediante dos brazos sostenidos por un par de resortes de carga. **Figura 2 -7.**

La profundidad se calcula mecánicamente y es desplegada en una pantalla de cinco dígitos.

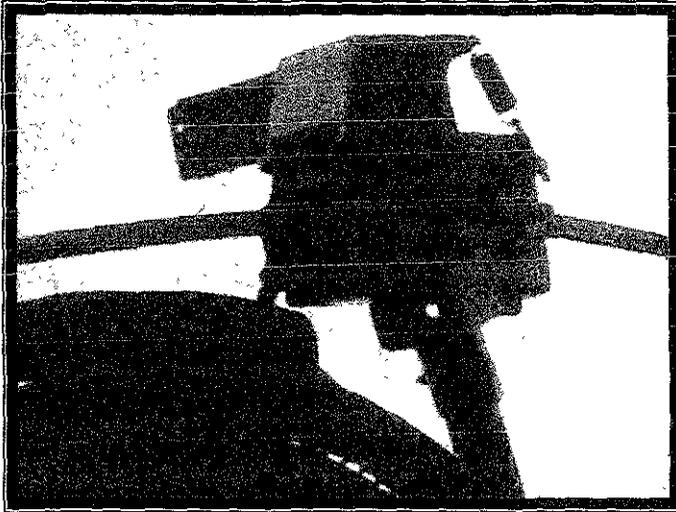


Figura 2 - 7 Contador de la tubería flexible

EQUIPO PARA EL CONTROL DEL POZO ^{2,4,1*}

Conjunto de Preventores

El sistema de preventores, es una parte importante de la unidad de tubería flexible. Estos se instalan sobre el árbol de válvulas o sobre la mesa rotaria.

El conjunto de preventores permite controlar las presiones del pozo de una forma segura , ya que son operados desde la cabina de control a través de un circuito y un acumulador. Este acumulador activa el juego de rams (arietes) para controlar el pozo en caso de emergencia, los arietes también pueden cerrarse en forma manual. **Figura 2 - 8.**

El sistema de preventores consta de cuatro arietes operados hidráulicamente. El arreglo del equipo de arriba hacia abajo es:

1 Ariete Ciego

Proporciona un sello total del pozo cuando la tubería flexible no existe. Debe notarse que la presión en los rams ciegos esta diseñada para contener únicamente presiones que provienen del interior del pozo.

2. Ariete de Corte

Se utiliza para cortar mecánicamente a la tubería flexible en el caso de quedar atrapada abajo del conjunto de preventores o cuando sea necesario cortar la tubería para mover el equipo de la superficie del pozo.

3. Arietes de Cuñas

Están equipados con dientes unidireccionales que al activarse se mueven en contra de la tubería para poder soportar su peso sin dañarla, y estas se activan cuando se presentan altas presiones en el pozo y se corra el riesgo de que la tubería sea expulsada.

4. Ariete Anular

Puede regularse el diámetro del ariete de acuerdo al diámetro de tubería que se está utilizando, aislando completamente la presión del espacio anular debajo de los rams.

Los rams ciegos y los rams de corte son generalmente separados de los rams de cuña y de los anulares por unas salidas con bridas en el cuerpo del preventor que es utilizada como línea de matar durante el control del pozo.

Si es necesario la válvula de salida en el conjunto de preventores, puede ser utilizada como retorno o circulación inversa de los fluidos. Las válvulas reguladoras conectan las diferentes secciones para igualar presiones a través del conjunto de preventores. La descarga central sirve como escape y puede liberar la presión en la línea, o puede funcionar como entrada de fluido en caso de emergencia.

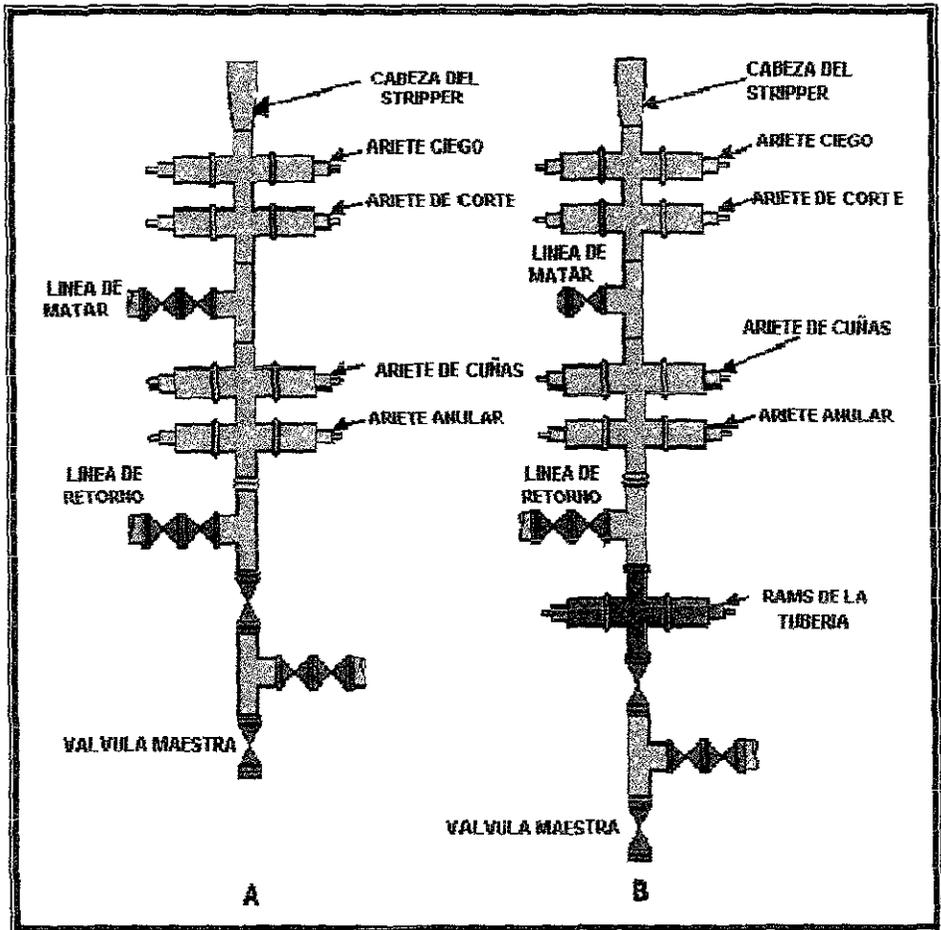


Figura 2 - 8 Conjunto de preventores

ESTOPERO (STRIPPER)

Está localizado en la parte inferior de la cabeza inyectora; tiene un rango de trabajo de 10,000 a 15,000 lb/pg² y es resistente al ácido sulfhídrico.

También es conocido con el nombre de **Prensaestopa**, y es un preventor que proporciona un sello entre la tubería flexible y el pozo durante las operaciones de recuperación e introducción de la tubería.

II.3 COMPONENTES SUBSUPERFICIALES DEL EQUIPO DE TUBERÍA FLEXIBLE

ENSAMBLE DE FONDO (BHA) ^{2,18}

En el diseño del ensamble de fondo para la perforación direccional se van a requerir de distintas herramientas, las cuales son las siguientes:

Barrenas

Su función principal es conseguir la velocidad de penetración adecuada con un peso relativamente menor en la barrena y altas velocidades de rotación. Para la perforación direccional, se requiere seleccionar barrenas con menor torque para mantener la trayectoria deseada del pozo.

Para la selección de barrenas se requiere de la evaluación de numerosos factores:

- Dureza y abrasividad de la formación,
- Geometría del pozo,
- Control direccional,
- Sistemas de rotación,
- Tipo de lodo de perforación.

Tipos de Barrenas:

Barrenas de diamante natural (TSP)

Las barrenas de diamante natural son cuerpos compactos (sin partes móviles) que cuentan con piedras de diamantes incrustadas parcialmente en su superficie inferior y lateral que trituran a las formaciones por arrastre o fricción. Las barrenas TSP (Thermally Stable Polycrystalline) o barrenas de diamante natural son requeridas para formaciones duras. Las barrenas TSP son térmicamente estables arriba de 1200°C, mientras que las barrenas convencionales resisten 750 °C.

La estructura policristalina expone un cortador afilado, haciendo a la barrena TSP más agresiva y resistente al impacto que los diamantes naturales. Los cortadores

TSP también cuentan con uniformidad dimensional, lo cual permite un rendimiento más consistente de la barrena.

Los diamantes naturales generalmente se rompen en formaciones fracturadas e inconsistentes. Las barrenas TSP se han aplicado a velocidades de 440 y 660 rpm con excelentes resultados en formaciones de lutitas, calizas y areniscas, donde barrenas de diamante natural y PDC han fallado.

Barrenas de diamante policristalino (PDC)

Estas son frecuentemente usadas para la perforación en secciones verticales o laterales. Estas barrenas son parecidas a las de diamante natural con la única diferencia que sus insertos son relativamente más grandes y perforan con el mismo mecanismo de fricción o arrastre. Este tipo de barrena es usado para una formación media a blanda, por lo que para formaciones de calizas y areniscas son demasiado duras y abrasivas. Son de alto rendimiento y pueden alcanzar ritmos de penetración de 2 a 3 veces mayor en comparación con las tricónicas al inicio de su vida útil, aunque después cae drásticamente hasta igualar el de las barrenas tricónicas, esta declinación se debe, al incremento del área de soporte conforme el desgaste aumenta, generando de esta forma menores esfuerzos en la roca.

Barrenas Tricónicas

Estas se constituyen de tres conos que giran sobre su eje. Las hay de dientes fresados (maquinados) y/o insertos de carburo de tungsteno. La trituración para éste tipo de barrena es por cizallamiento.

Cuando se va iniciar la desviación de un pozo se comienza con la barrena tricónica, para que la trayectoria del pozo sea la deseada, y se termina la perforación con barrena PDC. Esto se debe a que la barrena tricónica trabaja por cizallamiento y la barrena PDC trabaja por fricción o arrastre, además comúnmente se usan para incrementar las velocidades de perforación.

Molinos ^{2*,26}

Los molinos nos permiten triturar herramientas atrapadas dentro del pozo, atravesar tuberías de revestimiento, así como servir de guía para iniciar la apertura de la ventana.

Los molinos que se utilizan para la apertura de una ventana son:

□ Molinos de arranque (STARTING MILLS)

Los molinos de arranque son herramientas especializadas para molienda utilizadas conjuntamente con las cucharas fijas (WHIPSTOCKS) para ajustar ésta. Después se inicia la operación de molienda con el Piloto Ahusado guiando al molino a través del primer corte de la ventana de la tubería de revestimiento.

□ Molinos sandía (WATTERMELON)

Se utilizan de manera similar a los molinos de sarta excepto que es un molino más similar a una barrena. Se utiliza principalmente en tuberías de revestimiento de tipo guía de barrenas. Se corre directamente encima del molino de ventana en una operación de guía de barrenas.

□ Molinos de ventana (WINDOW MILLS)

Se utilizan enseguida del molino Starting mill en operaciones de guía de barrena. Este molino sigue a partir de donde el molino de arranque o starting mill terminó.

□ Molinos cónicos (TAPERED MILLS)

Pueden utilizarse para remover las rebabas y afinar las ventanas guía barrenas.

□ Molinos de sarta (STRING MILLS)

Son utilizados para afinar las ventanas guía de barrenas terminadas. Se corre directamente sobre del molino de ventana en una operación con barrena guía. Se utiliza con frecuencia en conjunto con los lastrarbarrenas de perforación y los molinos cónicos cuando se requiere ampliar un agujero reducido ya sea en la tubería de revestimiento o en formaciones.

Bent sub ³

Esta herramienta se utiliza para dar la inclinación del ensamble de fondo y se localiza arriba del motor de fondo junto a un bent housing.

Bent Housing (codo) ³

La función principal es orientar el motor de fondo, llevando velocidades de perforación de 20°/100 pies o mayores.

Cuando se requiera tener velocidades de perforación menores, entonces únicamente se utilizará el bent sub o bent housing.

MWD (Measurement While Drilling) ^{3,18,23}

Se utiliza para la inspección o medición durante la perforación determinando la posición relativa del pozo; es decir, la inclinación y azimut del pozo. Estos datos son transmitidos a la superficie a través del lodo de perforación y son registrados en una computadora.

Motores de fondo ^{3,18,21,1*}

Son herramientas hidráulicas que sirven para proporcionar rotación, velocidad y torque a la barrena o al molino durante la perforación. La energía para hacer rotar el motor, es proporcionada por el fluido que se circula a través de la sarta de herramientas desde la superficie.

El empleo de motores de fondo para la perforación de pozos direccionales, es una técnica que nos permite optimizar la perforación, y su empleo requiere definir antes ciertos factores como:

- Tipo de barrena a emplear.
- Tipo de fluido a emplear.
- Características de la formación.
- Condiciones de operación.

Tipos de motores de fondo:

- ❖ Motores tipo turbina.

Se utiliza en diámetros pequeños y en pozos con alta temperatura.

- ❖ Motores de aspa.

Aún no han sido probados todavía en el campo y su fabricación la hace la compañía, "Volker Stevens".

- ❖ Motores de desplazamiento positivo.

Los motores de desplazamiento positivo están disponibles en todos los diámetros, pero especialmente en diámetros pequeños. Su diseño y comportamiento pueden variar, por ejemplo los motores de fondo pueden ser diseñados para bajo torque-altas revoluciones o alto torque-bajas revoluciones. La barrena TSP se va a utilizar cuando se tengan altas velocidades y bajo torque en el motor. La barrena PDC se utilizará cuando tengamos velocidades medias y torque medio en el motor.

Criterios para la selección de un motor de fondo:

- Temperatura.
- Diámetro exterior.
- Número de etapas para calcular la velocidad.
- RPM vs Gasto.
- Torque vs Gasto.
- Máximo gasto.
- Máxima caída de presión.

La **Figura 2 – 9** es un ejemplo para la selección de un motor de fondo.

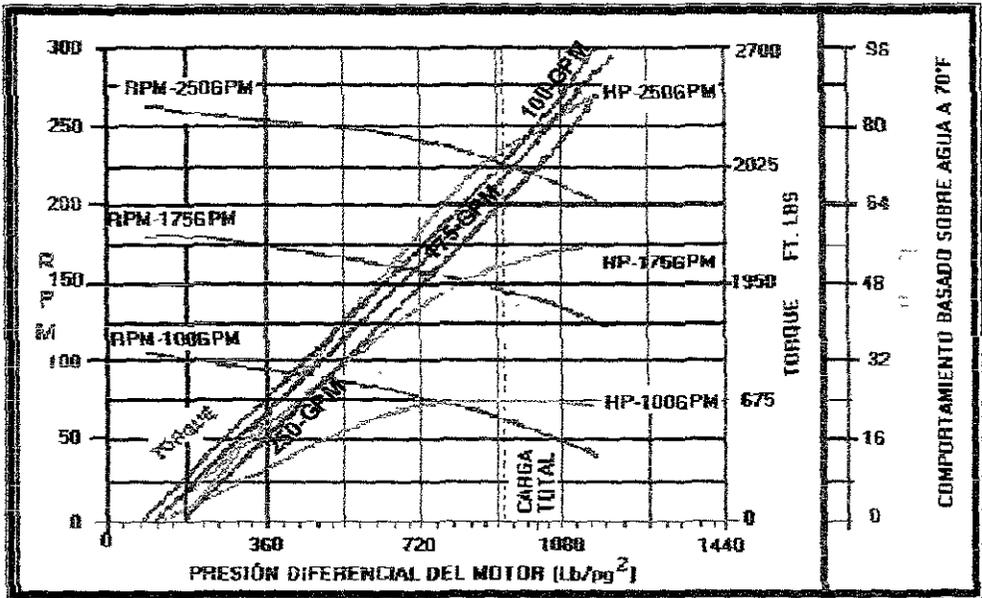


Figura 2 - 9 Selección del motor de fondo (Compañía Sperry Sun)

Muleshoe sub ³

Esta herramienta se coloca encima del motor de fondo y es usada para alinear la herramienta de inspección o MWD.

Lastrabarrenas ³

Los lastrabarrenas proveen el peso suficiente a la barrena, llevando a cabo una velocidad de penetración aceptable y también la resistencia adecuada para que el ensamble de fondo (BHA) pueda trabajar en compresión. Cuando se utiliza la herramienta direccional o sistema MWD, el tipo de lastrabarrenas será de tipo antimagnético, para que éstos no interfieran en los pulsos magnéticos que manda el MWD a la superficie. Los lastrabarrenas deberán tener suficiente diámetro interior para permitir la introducción de la herramienta direccional o MWD y para minimizar la caída de presión total.

Herramienta orientadora ^{3,23}

Esta herramienta se localiza encima del muleshoe sub, la cual orienta a la cuchara a utilizar en la apertura de la ventana en el inicio de la perforación direccional con ayuda de un registro Giroscópico.

Una vez orientada la cuchara se bajan los molinos y se comienza la apertura de la ventana. Las herramientas orientadoras que se usan en la actualidad son activadas por: mecanismos reciprocantes, ciclos de presión, el torque del motor de fondo durante la perforación, motores eléctricos en el fondo del pozo o la combinación de estas acciones.

Válvulas de circulación ^{3,23}

Esta válvula va instalada abajo del desconector hidráulico y es activada por la circulación de una bola hasta el asiento, cuando se abre la trayectoria del fluido es desviada arriba del equipo MWD, del motor de fondo y del soltador del empacador cuando es introducido, y éste dirige el flujo radialmente a través de los puertos de salida, permitiendo incrementar los gastos por pérdidas de fricción en las herramientas de fondo sin la restricción de gastos que limitan al motor de fondo. La válvula de circulación, es comúnmente abierta antes de efectuar el viaje de salida del pozo para aumentar la remoción de recortes.

Herramienta Desconectora ^{3,12,13,1*}

Cuando surge un problema durante la perforación y no se puede recuperar el ensamble de fondo se utiliza esta herramienta que va integrada en el ensamble, como seguridad.

En la actualidad existen 2 mecanismos de liberación:

1. Liberación por presión.
2. Liberación por jalón.

La desconexión por liberación de presión se activa al bombear un balín a través de la tubería, al llegar éste a la base de la herramienta desconectora, represiona a la sarta de tubería flexible rompiendo los pernos y por lo tanto se separa del ensamble de fondo.

Las herramientas de desconexión por corte son activadas por el estiramiento de la tubería flexible hasta un cierto límite de tensión, donde se produce un corte entre la tubería flexible y el ensamble de fondo.

Después de que la TF es liberada, las herramientas de pesca recuperan el ensamble de fondo.

Adaptador de la tubería flexible ^{3,1*}

Los adaptadores deben ser diseñados para resistir el torque desarrollado por el motor de fondo. La falla de los adaptadores de la tubería flexible tendrá como resultado un descontrol en la dirección del pozo o del ensamble de fondo (BHA).

Para evitar esto, los adaptadores usados durante las operaciones de perforación deberán ser capaces de manejar las vibraciones y aceleraciones que se generen, para que la tubería flexible no sufra daños.

La resistencia a la tensión de los adaptadores, deberá ser mayor a la resistencia a la tensión de la tubería flexible.

Juntas de seguridad ^{23,1*}

Estas herramientas se instalan debajo de las válvulas de contrapresión, como seguridad, en caso de presentarse en el pozo un problema de pegadura por presión diferencial o por algún tipo de atrapamiento (colapso, sólidos, asfaltenos, carbonatos, etc.), ésta podrá desconectarse y conectarse con la sarta adecuada para recuperarlo. **Figura 2 – 10.**



Figura 2 – 10 Junta de seguridad

Válvulas de contrapresión ^{23,1*}

Esta válvula abre a una predeterminada presión diferencial, evitando de ese modo sobre presurizar la sarta. Sin embargo, pueden utilizarse donde la presión diferencial máxima no deba ser excedida. Se instalan dentro de la sarta perforación abajo del conector de tubería flexible y se utilizan para prevenir la entrada de flujo de fluidos del pozo al interior de la tubería flexible.

Existen dos tipos de válvulas de contrapresión:

- Válvula de contrapresión con asiento para esfera (Válvula Check).

En el interior de esta válvula se aloja una esfera de acero que impide el paso de otras herramientas, limita el flujo de fluidos presentándose erosión en la base de la esfera ocasionado por los sólidos contenidos en el fluido de circulación. **Figura 2 – 11.**

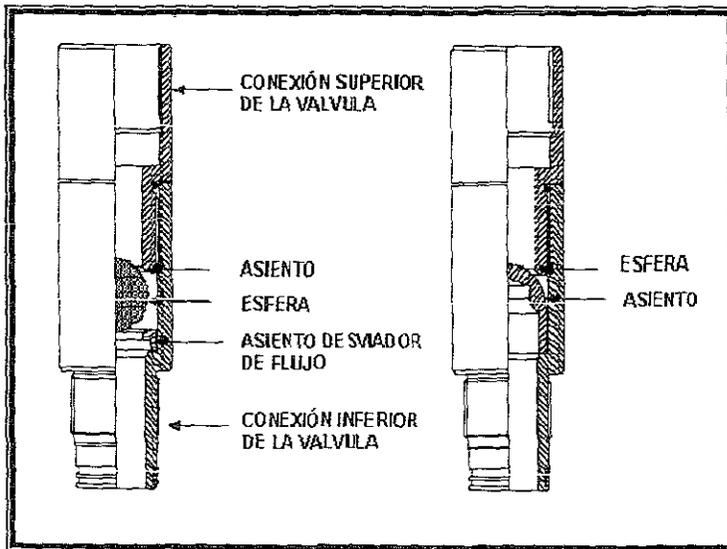


Figura 2 – 11 Válvula check

□ Válvula de contrapresión de charnela.

Estas permiten manejar herramientas de fondo como empacadores mecánicos, fluidos con alto contenido de sólidos y reducen la erosión en su interior debido a que no se origina turbulencia. **Figura 2 – 12.**

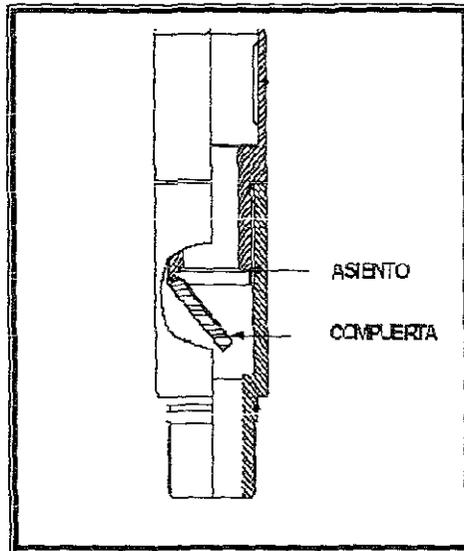


Figura 2 – 12 Válvula de charnela

Conectores para tubería flexible^{3,1,2}

La tecnología de la perforación con TF, en el manejo de diversos diámetros de tubería y herramientas de fondo; ha llevado al desarrollo de conectores con diferentes tipos de rosca que conectan la tubería con diferentes herramientas de fondo. Las características que un conector debe de cumplir son:

- Alta resistencia (igual a la de la TF).
- Sellos de elastómero. Estos aseguran la presión interna y externa de la tubería existente en el pozo.

El conector se une a la tubería con el ensamble de fondo exteriormente y en algunos casos internamente, no restringe el diámetro interior ni el flujo de fluidos.

Los conectores son instalados y desmantelados fácilmente sin interrumpir el enrollado de la tubería.

Actualmente, existen dos tipos de conectores: roscados y no roscados.

Conexiones Roscadas.

Este conector es el más utilizado en las sartas de herramientas de fondo, ya que permite operar bajo tensión, torsión y no reduce el diámetro interior de éste.

Los tipos de roscas más comunes en operaciones de TF son:

- Conexión Dowell Estandar, Hydrill CS, AW / BW ROD, API Regular y API Internal Flush.
- Otras dependen de las especificaciones del fabricante, como la conicidad, sello, etc.

Conexiones no Roscadas.

Este tipo de conexiones se utiliza donde es difícil rotar las herramientas al conectarlas en la superficie.

Tipos de Conectores:

- Conector de cuñas. Este tipo de conector utiliza una acción de acuñamiento para apretar firmemente sobre el diámetro exterior de la tubería flexible, mediante un elemento en forma de anillo cónico que contiene cuñas para la retención de la tubería. En la parte inferior del conector contiene una conexión de rosca del tipo metal-metal.
- Conector con tornillos de presión (Allen). Este conector sujeta a la tubería mediante una unión sustituta (no contiene cuñas), la cuál consta de ocho tornillos de presión Allen, estos se fijan en un agujero perforado de la unión sustituta y con rosca del tipo tornillo de presión.

En el extremo inferior del conector existe la conexión con rosca estándar para conectar las herramientas de trabajo.

- Conector con cuñas y tornillos de presión. Este conector es una combinación de los anteriores, con la finalidad de proveer una mayor seguridad durante las operaciones.

- Conector ondulado (roll-on). Éste tiene una forma diferente de unirse, ya que se realiza por dentro de la tubería, el agarre se efectúa en el interior de la tubería y es retenido transversalmente en el lugar por ondulaciones o un corrugado alrededor del conector en su parte inferior.
- Conector hidráulico rápido. Este conector facilita la conexión rápida y segura en el primer intento, reduciendo el tiempo requerido para instalar el equipo de tubería flexible.

A continuación se presentan algunos modelos conocidos como conector-desacoplador hidráulico:

- TOT JHS conector-desacoplador hidráulico. Este conector es comúnmente usado en conjunto con una estructura en operaciones de tubería flexible costa afuera. Normalmente se localiza entre la estructura y en cabezal de flujo o tubería de perforación y soporta el peso de toda la sarta.
- TOT JHR conector-desacoplador hidráulico. Este conector puede ser usado en conexiones de cualquier tubería y se localiza entre el cabezal de inyección y los preventores.
- BEA-MAG "modelo T" conector hidráulico rápido. Este puede ser usado en cualquier conexión de tubería y generalmente se localiza entre el cabezal de inyección y los preventores.

La Tabla 1", nos muestra las características de los conectores no roscados.

Tipo de conector	Diám. de TF (pg)	Diám. Ext. (pg)	Diám. Int (pg)	Presión máx. de trabajo (psí)	Temp máxima (°F)	Tensión máx (lbf)	Tol al torque (pies-lbf)	Peso (lbm)
De cuñas	1-1/4	1.70	0.93	5000	300	excede el valor de la tubería	-	-
Tornillos de presión	1-1/4	1.75	0.75	5000	300	25000	excede el valor de la tubería	-
	1-1/2	2.00	1.06					-
	1-3/4	2.25	1.12					-
Ondulado (Roll-On)	1-1/4	1.25	0.62	5000	300	21000	50	-
	1-1/2	1.5	0.62					-
	1-3/4	1.75	1.00					-
(Rápido) JHS	Cualquiera	-	3/8 a 5/8	10000	-	-	-	980 a 1500
(Rápido) JRH	Cualquiera	-	3 a 5	10000	-	-	-	300 a 505
(Rápido) BEA-MAG "T"	Cualquiera	-	3.06	10000	-	-	-	300

A continuación se presentan dos tipos de BHA para pozos verticales y direccionales respectivamente. **Figura 2- 13**

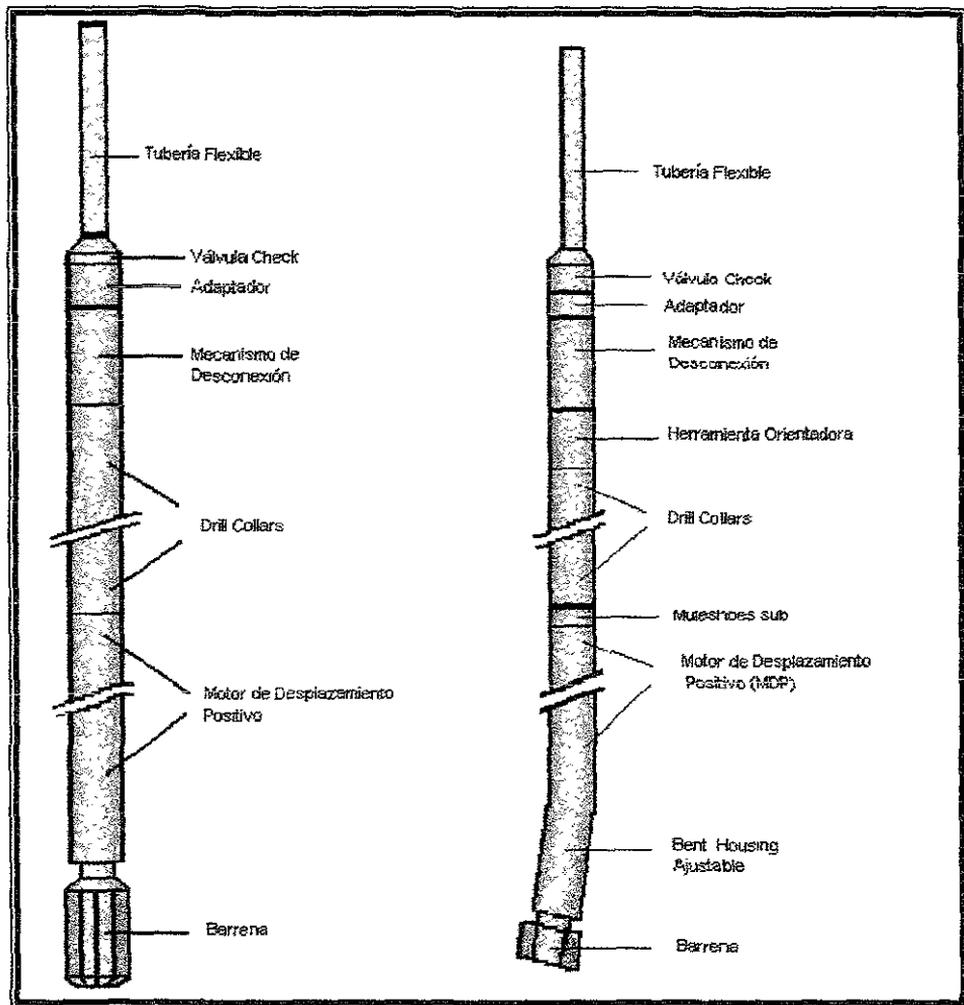


Figura 2 – 13 Ensamblajes de fondo para pozos verticales y direccionales.

CAPÍTULO III

VIDA ÚTIL DE LA TUBERÍA FLEXIBLE (FATIGA)

La fatiga en la tubería flexible ocurre principalmente debido a los ciclos constantes de flexión en el equipo superficial, presentando una deformación plástica en la tubería.

III.1 PUNTOS DE DEFORMACIÓN DE LA TUBERÍA FLEXIBLE ^{1,2}

El primer punto donde ocurre la deformación de la tubería flexible, es en el carrete. El grado de deformación que se presente en este punto dependerá de la cantidad de tubería enrollada.

Al salir la tubería del carrete, ésta llega al cuello de ganso; en este punto, los roles que se utilizan deberán tener el tamaño y posición adecuada para recibir la tubería y guiarla hacia los blocks de cadena. Esta selección adecuada se verá reflejada en la vida útil de la tubería flexible.

Durante un viaje de ida y vuelta de la tubería, ésta se somete a seis eventos de curvatura o doblamiento plástico, cuatro de ellos se presentan en la guía de la tubería y dos ocurren en el carrete. **Figura 3 - 1.**

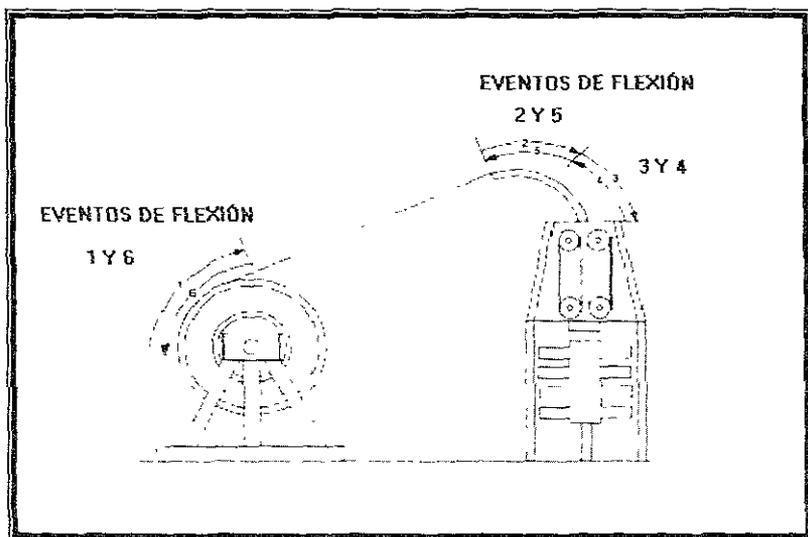


Figura 3 - 1 Puntos de deformación de la tubería

La capacidad que pueda brindar la tubería flexible debido a los ciclos de trabajo, puede limitarse debido a:

- Los ciclos de flexión
- Límites de presión y tensión
- Límites de diámetro y ovalidad

III.2 PREDICCIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE LA TUBERÍA FLEXIBLE ⁵

Para hacer un pronóstico de la vida útil de la tubería flexible, debemos hacer un análisis de los esfuerzos de doblamiento, circunferenciales (anillo de esfuerzos) y alternados (doblamiento y circunferencial) para calcular en que grado afectan y estimar el recorrido total de la tubería flexible.

Ya que debido a estos esfuerzos, los factores de: presión interna, diámetro del carrete, radio del cuello de ganso, corrosión, soldadura a tope, daños mecánicos, y características de la tubería como: el espesor de pared, esfuerzo a la cedencia, pueden afectar la vida útil de la tubería flexible.

El máximo esfuerzo de doblamiento de la tubería flexible en el carrete y el cuello de ganso es:

$$S_{or} = \frac{d_o E}{D_r + d_o} \quad (3.1)$$

$$S_{ag} = \frac{d_o E}{2(R_g + \frac{d_o}{2})} \quad (3.2)$$

donde:

S_{or} : Esfuerzo de doblamiento de la TF en el carrete (lb/pg²)

S_{ag} : Esfuerzo de doblamiento de la TF en el cuello de ganso (lb/pg²)

d_o : Diámetro exterior de la TF, (pg)

E : Módulo de Young de la TF, (30x10⁶ lb/pg²)

D_r : Diámetro del núcleo del carrete, (pg)

R_g : Radio del cuello de ganso, (pg)

El esfuerzo circunferencial debido a la presión interna en la tubería flexible, se define de la siguiente forma:

$$S_h = \frac{2d_i^2 P_i}{d_o - d_i^2} \quad (3.3)$$

donde:

S_h : Esfuerzo circunferencial de la TF debido a la presión interna (lb/pg²).

P_i : Presión interna (lb/pg²).

d_i : Diámetro interior de la TF (pg).

d_o : Diámetro exterior de la TF (pg).

De acuerdo al modelo de fatiga de Avakov, los esfuerzos alternados de la tubería flexible se define como:

$$S_r = S_{ar} + (S_h)^{1.895} \quad (3.4)$$

$$S_g = S_{ag} + (S_h)^{1.895} \quad (3.5)$$

donde:

S_r : Esfuerzo alternado equivalente en el carrete (lb/pg²).

S_g : Esfuerzo alternado equivalente en el cuello de ganso (lb/pg²)

El recorrido total de la tubería flexible antes de ser dañada puede calcularse de la siguiente manera:

$$T_s = \frac{k_c k_s k_m k_Q N_m}{\left(\frac{S_r}{S_m}\right)^2 + 2\left(\frac{S_g}{S_m}\right)^2} \quad (3.6)$$

donde:

k_c : Factor de corrosión de la TF, $k_c = 0.5 - 1$.

k_m : Factor de compensación del esfuerzo de cedencia de la TF.

k_Q : Factor de predicción de vida de la TF.

k_s : Factor de concentración de esfuerzos, $k_s = 0.33 - 1$.

N_m : Ciclo de la vida media de la TF, ($N_m \approx 130$).

S_r : Esfuerzo alternado equivalente en el carrete, (lb/pg²)

S_g : Esfuerzo alternado equivalente en el cuello de ganso, (lb/pg²)

S_m : Esfuerzos de daño en la TF, (10^6 lb/pg²).

III.3 ANÁLISIS DE PREDICCIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE LA TUBERÍA FLEXIBLE⁵

PRESIÓN INTERNA

Debido a una alta presión interna, se presentan esfuerzos alternados (doblamiento y circunferencial) en el carrete y el cuello de ganso que ocasionan una reducción en el recorrido total de la tubería flexible. **Figura 3 – 2**

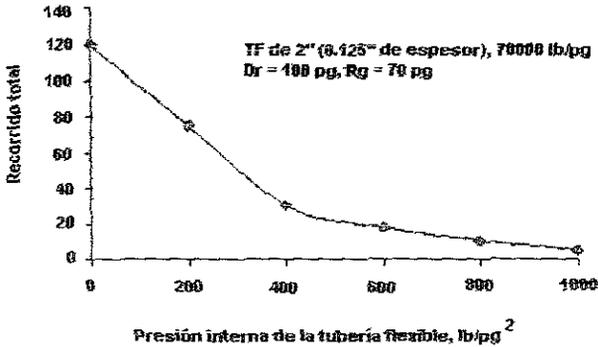


Figura 3 - 2

ESPESOR DE PARED

Conforme aumenta el espesor de pared, el esfuerzo circunferencial (Ec. 3.3) disminuirá; pero antes de eso, los esfuerzos alternados (Ec. 3.4 y Ec. 3.5) decrecerán y el recorrido total de la tubería flexible aumentará. **Figura 3 – 3.**

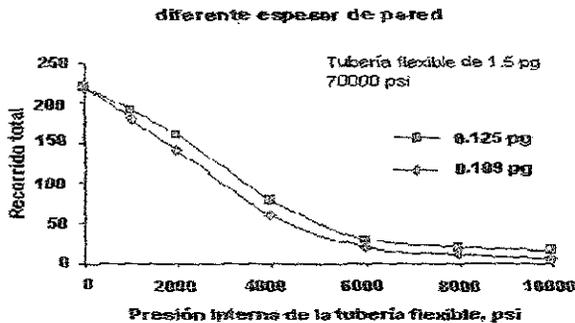


Figura 3 - 3

TAMAÑO DE LA TUBERÍA FLEXIBLE

Para las ecuaciones 3.1 y 3.2, el esfuerzo de doblamiento en la tubería flexible disminuirá cuando el tamaño sea menor, es decir, que el diámetro interno sea menor o que aumente el espesor de pared de la tubería.

El esfuerzo circunferencial (Ec. 3.3) generalmente disminuye; puesto que realmente es afectado por la ovalidad. **Figura 3 - 4**

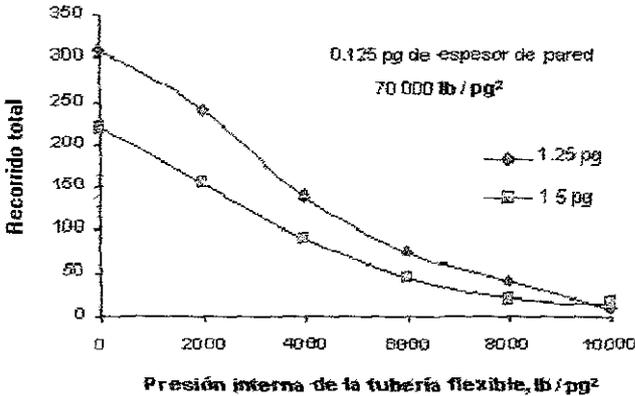


Figura 3 - 4

ESFUERZO A LA CEDENCIA

El efecto del esfuerzo a la cedencia será diferente para cada tubería flexible, de acuerdo a la resistencia de sus materiales.

El efecto del esfuerzo para cada tubería es representado por K_m en la ecuación 3.6.

El factor de resistencia a la cedencia es:

$$k_m = \left[\frac{\ln\left(1 - \frac{RA}{100}\right)}{\ln(0.47)} \right] \quad (3.7)$$

donde:

k_m : Factor de compensación del esfuerzo de cedencia de la TF.

RA : Es el factor de reducción del área de la TF.

Por ejemplo:

Tubería flexible	RA	K_m
QT - 700 y equivalente	53	1
QT - 800 y equivalente	57	1.25

EL DIÁMETRO DEL CARRETE Y EL RADIO DEL CUELLO DE GANSO

Al aumentar el diámetro del carrete y el radio cuello de ganso (Ecs. 3.1 y 3.2), el esfuerzo de doblamiento de la tubería flexible será menor; así como también los esfuerzos alternados (Ecs. 3.4 y 3.5) dando un mayor uso a la tubería flexible.

Figura 3 - 5

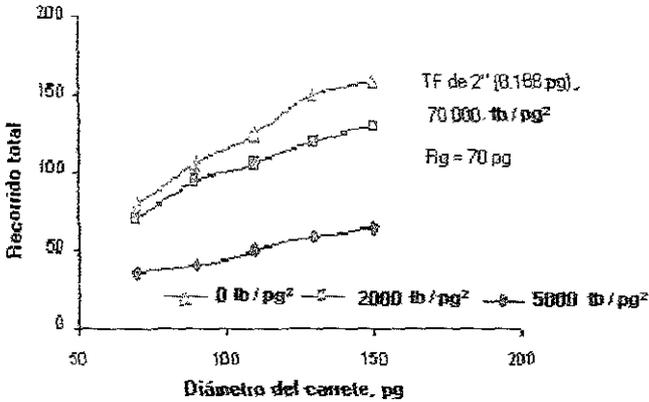


Figura 3 - 5

CORROSIÓN ⁵

La tubería flexible esta sujeta a la corrosión debido a:

- ☞ Sustancias corrosivas ó fluidos producidos del pozo como H_2S , que causa un daño severo en la tubería flexible.
- ☞ Exposición de la tubería flexible al medio ambiente.

En la ecuación 3.6, el factor K_c representa el efecto de corrosión de la tubería flexible debido a los fluidos que se manejen. En la tabla 2 nos muestra los valores de K_c .

Tabla 2 Valores de K_c para diferentes fluidos

K_c	Fluido
1	Nitrógeno o agua
0.66	Cemento o ácido
0.5	H_2S

Por ejemplo: Debido a estimulaciones, la vida útil de la tubería flexible puede reducirse hasta un 34% y hasta un 50% en los pozos con H_2S comparado con las operaciones con nitrógeno o agua.

Los operadores pueden reducir la corrosión de la tubería flexible expuesta al medio ambiente, tratándola con inhibidores dependiendo el grado de corrosión que presente la tubería; además de proteger al medio ambiente del uso de los inhibidores de corrosión.

SOLDADURA ^{5,1*}

Cuando la tubería es soldada tubo a tubo (soldadura a tope), causa una concentración de esfuerzos en las uniones de los tubos reduciendo la vida útil de la tubería flexible. **Figura 3 – 6**

Esta concentración de esfuerzos se considera en la ecuación 3.6 con el factor K_s , en la tabla 3 se muestran los valores para diferente tipo de soldadura.

Tabla 3 Valores de K_s para diferentes tipos de soldadura

K_s	Tipo de soldadura	Reducción de vida de la tubería flexible
1	Sin conexión a tope	
0.7	Suavemente revestido	30 %
0.5	Pobremente revestido	50 %
0.31	Sin revestir	69 %

Esta soldadura origina dos problemas: el debilitamiento de la tubería y la restricción de flujo en el interior. Cuando la tubería flexible esta sujeta a corrientes de gas la tubería se fatiga más rápido, debido a un alto porcentaje de fallas en la zona de unión de los tubos.

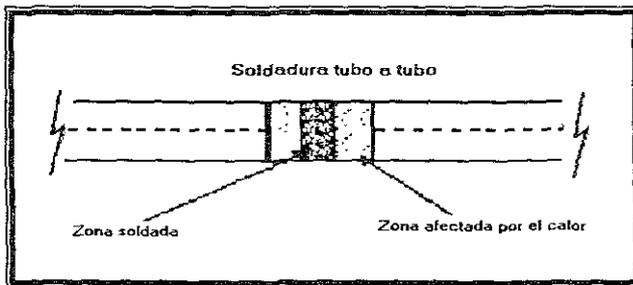


Figura 3 – 6 Soldadura tubo a tubo

Cuando la tubería es soldada al sesgo, la resistencia de la tubería mejora considerablemente así como la vida útil. **Figura 3 – 7**

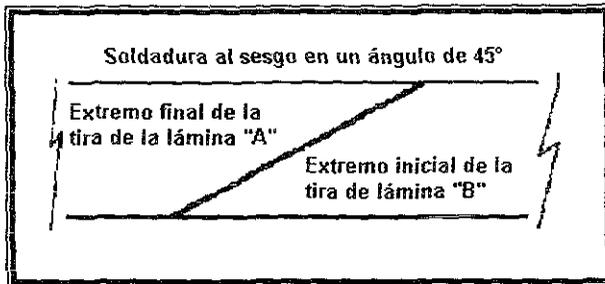


Figura 3 – 7 Soldadura al sesgo

DAÑOS MECÁNICOS ⁶

Los daños mecánicos de la tubería flexible pueden ocurrir:

- Al exceder la tensión de la tubería.
- Enrollar desalineadamente la tubería flexible en el carrete.
- Trabajar con equipo dañado o gastado.

“ABOMBAMIENTO” O INCREMENTO DEL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA FLEXIBLE ^{1,6,9,25}

La tubería flexible puede “abombarse” o incrementar su diámetro debido al manejo de:

- Alta presión interna
- Efectos de flexión
- Manejar espesores mínimos de pared

Estas causas pueden evitarse con el mantenimiento y selección adecuada de los componentes de la unidad de la tubería flexible.

III.4 MÉTODOS PARA LOCALIZAR LA FATIGA EN LA TUBERÍA FLEXIBLE ^{1,7,8}

Para minimizar la fatiga de la tubería flexible en un solo punto durante la vida de trabajo, se han propuesto varios métodos como:

- Método de pies recorridos (“Running Feet”)
- Número de viajes de la tubería flexible
- Monitoreo de la Fatiga

Método de “Pies recorridos” (Running - Feet)

El método “pies recorridos” (running-feet) es un método estándar, en el cual el operador lleva un registro de los ciclos acumulados de la sarta medidos en una sola dirección, para retirar la tubería cuando ésta haya llegado a su límite

Ventajas

- ☐ Solamente requiere medir los ciclos
- ☐ Su aplicación es sencilla

Desventajas

- ☐ Son limitadas las consideraciones en el tamaño de la tubería flexible, el radio de doblamiento, tipo de material, presión interna que se presentan durante los ciclos.
- ☐ El método de “pies recorridos” es un método arcaico y defectuoso refiriéndose a los períodos excesivos de trabajo en la tubería flexible, mostrándonos una indicación falsa de las condiciones de la tubería, ya que puede estar en un margen de daño o deterioro.

Número de viajes de la tubería flexible:

Un método más efectivo es el “mecanismo de rutina” (**routine cutoff**) . Al utilizar este método, los operadores eliminan 20 a 50 pies de tubería flexible trasladando la longitud predeterminada y ayudando a separar la fatiga acumulada en un área extensa, especialmente en los puntos donde es controlado el peso de la sarta.

Generalmente los operadores controlan el peso de la sarta en intervalos de 1000 pies cuando se efectúa el primer viaje en el pozo, el resultado de esta práctica es poner fin a la fatiga sobre el perfil de vida del trabajo de la sarta.

El método más efectivo en la administración de tubería flexible es el “mecanismo específico de trabajo” (**job – specific – cutoff**) . Este método es parecido al anterior y se realizan mejores trabajos cuando las profundidades de los pozos son similares, pero también es útil cuando se utiliza a varias profundidades.

Para el uso de este método, el operador debe actualizar la información del trabajo de la sarta después de cada operación.

Este método ayuda a evitar el deterioro en un sitio y también a maximizar el potencial costo – beneficio de la sarta de tubería flexible.

Monitoreo de la Fatiga

Este modelo tiene como objetivo predecir la vida de la tubería flexible haciendo un análisis en cualquier punto de la sarta variando sus propiedades (tamaño, espesor de pared, composición, resistencia a la cedencia).

Posteriormente, realiza una secuencia de los eventos de doblamiento y también considera las condiciones de presión.

Debemos considerar que los modelos no pueden ser exactos para predecir la fatiga debido a:

- La exactitud en los mismos modelos
- La exactitud de los datos de entrada
- La calidad en la historia de los trabajos de la sarta de tubería flexible
- Los métodos aplicados para localizar la fatiga

Beneficios en los avances en el monitoreo de la fatiga

-En comparación con los métodos anteriores, presenta mayor seguridad en los trabajos con tubería flexible y aumenta su uso.

- Identifica las secciones mayormente fatigadas para ser reparadas posteriormente (eliminar las secciones dañadas) o utilizarla para otras operaciones.

¿Cómo minimizar la fatiga?

Algunos pasos que pueden ayudar a minimizar la fatiga en la tubería flexible son:

- Maximizar el radio del cuello de ganso
- Maximizar el diámetro del carrete
- Utilizar un espesor de pared mayor
- Reducir la presión interna cuando se esta movilizandando la unidad
- Reducir el movimiento de la tubería
- Cambiar la composición de los materiales de la tubería flexible.

CAPÍTULO IV

CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE PERFORACIÓN CON TUBERÍA FLEXIBLE

En el diseño de sartas para la perforación con tubería flexible se tienen que considerar los siguientes puntos:

- Límites mecánicos de la TF.
 - ❖ Propiedades de la tubería flexible.
 - ❖ Presión interna en la Tubería Flexible.
 - Aumento en el Diámetro en la tubería (Efecto de "Abombamiento").
 - Estallamiento de la tubería.
 - ❖ Cálculo de la Presión de Colapso en la Tubería Flexible.
 - ❖ Límites Operacionales.
 - Principales Esfuerzos en la Tubería Flexible.
- Pandeo de la tubería flexible.

IV.1 LÍMITES MECÁNICOS

PROPIEDADES DE LA TUBERÍA FLEXIBLE ^{1,2}

Para comprender mejor el comportamiento de los materiales, la Ley de Hooke establece que el esfuerzo es igual a la deformación multiplicada por el módulo de elasticidad. Este esfuerzo se representa de la manera siguiente:

$$\sigma = E \varepsilon \quad (4.1)$$

donde:

E : Módulo de elasticidad, (lb/pg²)

σ : Esfuerzo del material, (lb/pg²)

ε : Deformación del material, (adimensional)

La **Figura 4 - 1**, nos ayuda a definir el comportamiento del un acero HSLA (High Strength Low Allow) durante un servicio normal.

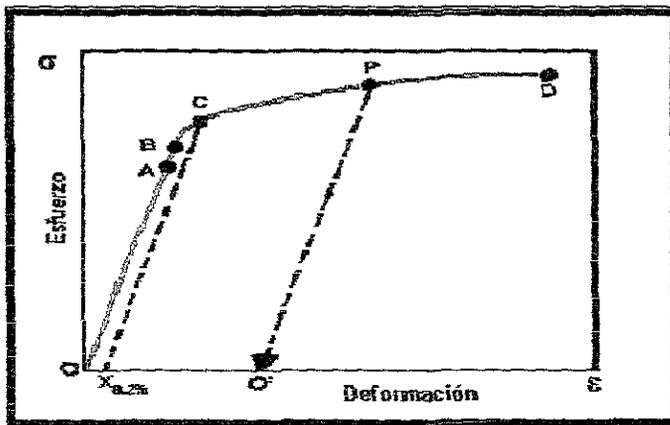


Figura 4 - 1 Curva típica de esfuerzo - deformación

La relación entre el esfuerzo y la deformación es representada por la línea O - A de la figura 4 - 1. El punto A es el esfuerzo y se conoce como límite de proporcionalidad. Arriba de éste límite se encuentra el punto B, y representa el límite de elasticidad.

Si el acero tiene un esfuerzo menor al límite elástico, el esfuerzo es considerado elástico y no ocurrirá una deformación permanente en la tubería flexible.

Al aplicar cargas excesivas, el esfuerzo del material se incrementa más allá del límite elástico, llegando hasta el punto C, que representa el punto de cedencia. En este punto el material tendrá una deformación permanente.

La línea punteada C - O_{0.2%}, representa el margen de seguridad para localizar el punto de cedencia sobre la curva esfuerzo - deformación.

La línea P - O' definida por el módulo de elasticidad y la intersección con el eje X, es el evento de deformación plástica

Aplicando esfuerzos adicionales se llegará hasta al punto D entonces, el material sufrirá un daño de separación, es decir, se romperá. Cuando la TF se encuentra enrollada en el carrete las deformaciones plásticas y el rendimiento del acero HSLA se van a representar en la curva O-P de la figura 4 - 1.

PRESIÓN INTERNA EN LA TUBERÍA FLEXIBLE ^{1,3,4,9,10,11,12,25}

AUMENTO EN EL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA FLEXIBLE (EFECTO DE "ABOMBAMIENTO")

El incremento del diámetro en la tubería flexible, comienza debido a la presión interna que existe en la tubería durante los ciclos de doblamiento.

Una prueba clara donde podemos observar este incremento, es cuando el tubo llega al stripper, esta se verá forzada al pasar a través de éste o simplemente no pasará. Entonces se abrirá un poco más el stripper para poder sacar la tubería y repararla.

Cuando la presión interna aumenta se tiene como consecuencia la presión de estallamiento.

PRESIÓN DE ESTALLAMIENTO

Al incrementar la presión interna en la tubería durante los ciclos de doblamiento, ésta se "abomba" y ocasiona que el diámetro de la tubería se incremente. Este efecto de "abombamiento", causa que las paredes de la tubería se adelgacen; siendo muy dramático cuando la presión interna es muy alta.

La **Figura 4 - 2** ilustra el diámetro de tubería contra el número de ciclos de doblamiento para una tubería de 1 ¼ pg x 0.087 de espesor de pared y 70,000 lb/pg² de cedencia probada para una presión interna de 2500 y 5000 lb/pg².

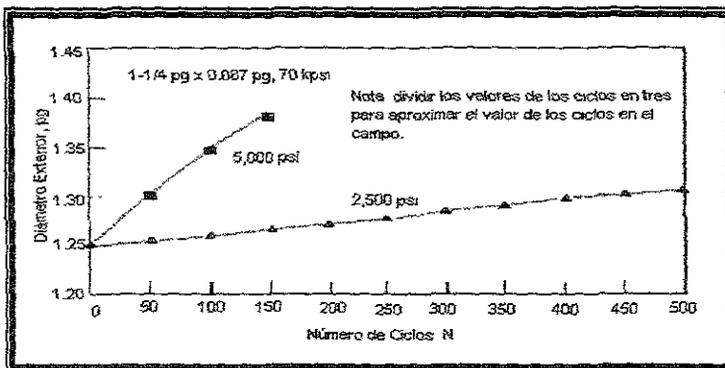


Figura 4 - 2

Las dos curvas representan el “abombamiento” del tubo cuando recorre un radio de doblamiento de 72 pg, teniendo como consecuencia una deformación plástica.

El valor teórico para calcular el estallamiento de la tubería flexible, es usando la norma API RP 5C7, cuando las condiciones dinámicas deforman plásticamente el cuerpo del tubo bajo un límite de presión.

La ecuación que calcula la presión de estallamiento es:

$$P_{est} = \frac{2\sigma_{yp}}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{2t}{OD}} \right) \quad (4.2)$$

donde:

P_{est} : Presión de estallamiento de la tubería flexible (lb / pg²).

σ_{yp} : Esfuerzo a la cedencia del material (lb / pg²).

$2t$: Espesor de pared de la tubería flexible (pg).

OD : Diámetro exterior de la tubería flexible (pg).

Otros factores que deben considerarse para determinar las condiciones reales de la tubería son: la corrosión interna y externa en el cuerpo de la tubería, la exposición a sulfuros o cloruros, agrietamientos e imperfecciones en la superficie del tubo como abolladuras y / o picaduras.

COLAPSO EN LA TUBERÍA FLEXIBLE ^{1,4,10,11,12,25}

Debido a los esfuerzos axiales y de presión externa, la tubería flexible puede colapsarse causando daño en la superficie de tubo.

El colapso en la tubería flexible depende de los siguientes factores:

- Ovalidad
- Resistencia a la cedencia
- Espesor de pared

Ovalidad

La tubería flexible trabaja continuamente dentro y fuera del carrete y del cuello de ganso, perdiendo su redondez hasta llegar a ser ovalada. Esta ovalidad puede incrementarse del 1 al 4% como resultado de los trabajos sobre el cuello de ganso y el radio de doblamiento del carrete mal seleccionado.

La ovalidad se define como:

$$Ovalidad = \left(\frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} \right) \quad (4.3)$$

donde:

D_{\max} : Diámetro exterior de la tubería flexible (pg)

D_{\min} : Diámetro interior de la tubería flexible (pg)

D : Diámetro exterior de la tubería flexible especificado por el fabricante (pg)

Actualmente hay pocas investigaciones para determinar el efecto de ovalidad en la tubería flexible sobre la resistencia al colapso. La primer teoría sugiere que la tubería flexible comienza a deformarse teniendo una menor redondez, lo que reduce dramáticamente la resistencia al colapso. Al aplicar una carga de tensión en la tubería flexible, esta puede ocasionar mayores daños sobre la resistencia al colapso en comparación con tuberías que presentan deformaciones pequeñas. En los servicios tubería flexible, las cargas de tensión se aplican de acuerdo a la clase, peso y fuerza de fricción cuando se saca la tubería del pozo.

Resistencia a la cedencia y espesor de pared.

Mientras se apliquen cargas de tensión menores que la resistencia a la cedencia de la tubería flexible, ésta comenzará a estirarse permanentemente y debajo del cuello de ganso se aplicará el punto máximo de esfuerzo de tensión

El espesor de pared es importante, ya que al aumentarse la resistencia al colapso de la tubería, será mayor.

Cálculo de la presión de colapso en la tubería flexible.

Para el cálculo de la presión de colapso se considera que la tubería no es completamente redonda, por lo tanto siempre se tiene que considerar una ovalidad mínima del 2%.

Para tamaños de tubería flexible estándar y espesor de pared, la ovalidad que debe considerarse para el cálculo de la presión al colapso es de 2 al 5% como lo indica la norma API RP 5C7. **(VER ANEXO).**

Cuando la ovalidad inicial es diferente a éste rango, la presión al colapso de acuerdo a la norma API RP 5C7 es:

$$P_{co} = g - g^2 - f \quad (4.4)$$

donde:

$$g = \frac{\sigma_{yp}}{D - 1} + \frac{P_c}{4} \left(2 + 3 \left[\frac{D_{max} - D_{min}}{D} \left(\frac{D}{t_{min}} \right) \right] \right) \quad (4.5)$$

$$f = \frac{2\sigma_{yp}P_c}{D - 1} \frac{1}{t_{min}} \quad (4.6)$$

σ_{YP} : Esfuerzo mínimo a la cedencia (lb / pg²)

P_c : Presión de colapso determinada para una tubería redonda (lb / pg²)

P_{co} : Presión de colapso para una tubería ovalada (lb / pg²)

$D_{m\acute{a}x}$: Diámetro exterior máximo (pg)

$D_{m\acute{i}n}$: Diámetro interior mínimo (pg)

D : Diámetro exterior especificado (pg)

t_{min} : Espesor mínimo de pared (pg)

Cuando las cargas de tensión (L) ó torque (T) se combinan con la presión externa (P); la presión externa admisible antes del colapso (P_o) es:

$$P_o = P_{co}k \quad (4.7)$$

donde :

P_{co} : Presión de colapso para una tubería ovalada (lb / pg²)

K : Factor de corrección de la presión al colapso debido a la carga de tensión (L), o de torsión (T) y se calculan de la siguiente forma:

$$k = \left\{ \left(1/SF \right)^4 - \left(\frac{L}{L_y} \right)^4 \right\}^{\frac{3}{4}} \quad (4.8)$$

$$k = \left\{ \left(1/SF \right)^4 - \left(\frac{T}{T_y} \right)^4 \right\}^{\frac{3}{4}} \quad (4.9)$$

donde:

L_y : La carga sobre el cuerpo de la tubería (lb / pg²)

T_y : Esfuerzo de cedencia a la torsión (lb / pg²)

S.F : Factor de seguridad (S.F \geq 1)

LÍMITES OPERACIONALES EN LA TUBERÍA FLEXIBLE ^{1,1*}

En las operaciones con tubería flexible, las cargas externas aplicadas a la tubería causan esfuerzos que limitan la vida útil y su capacidad.

Estos esfuerzos pueden ser:

- Axiales
- Presión (radial, circunferencial)
- Torsión

PRINCIPALES ESFUERZOS EN LA TUBERÍA FLEXIBLE

Los principales esfuerzos que sufre la tubería flexible se muestran en la **Figura 4 - 3**.

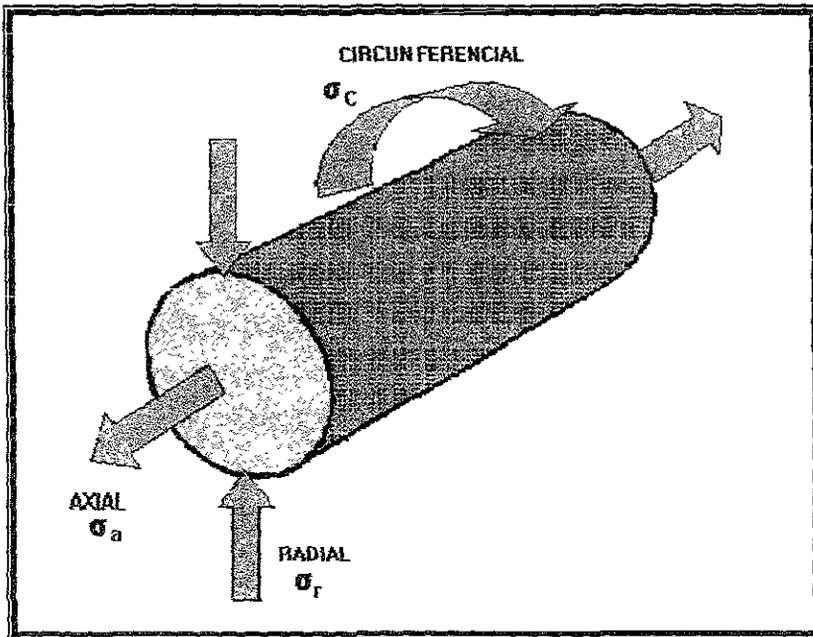


Figura 4 - 3 Principales esfuerzos en la tubería

- Esfuerzo axial (σ_a)

La tubería se encuentra constantemente bajo los esfuerzos de tensión y compresión cuando ésta se extrae o se introduce al pozo; esto se debe al doblamiento que sufre la tubería tanto en el carrete como en el cuello de ganso durante los viajes.

El esfuerzo axial se define como:

$$\sigma_a = \frac{F_a}{A_{acero}} \quad (4.10)$$

Los esfuerzos que sufre la tubería de tensión y compresión se calculan de la siguiente manera:

$$\sigma_{doblamiento} = \pm \frac{E \times OD}{2R} \quad (4.11)$$

donde:

- $\sigma_{doblamiento}$: Esfuerzo de doblamiento, (lb/pg²).
- E : Módulo de elasticidad del material, (lb/pg²).
- OD : Diámetro exterior de la tubería flexible, (pg).
- R : Radio de flexión, (pg).

El signo positivo en la ecuación se refiere a que la parte superior del cuerpo de la tubería sobre el radio de flexión se encuentra en tensión y el signo negativo significa que la parte inferior de la tubería sobre el radio de flexión se encuentra expuesta a compresión.

El esfuerzo total en cualquier punto de la tubería flexible es:

$$\sigma_{total} = \sigma_a \pm \sigma_{doblamiento} \quad (4.12)$$

- Esfuerzos debido a la Presión

Al manejar presiones internas y externas, en la tubería flexible se presentan los siguientes esfuerzos:

- Radial (σ_r)
- Circunferencial (σ_h)

Las ecuaciones que define Lamé para el esfuerzo radial y circunferencial son:

$$\sigma_r = \frac{(P_o - P_i)r_i^2 r_o^2}{r^2(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{(r_o^2 - r_i^2)} \quad (4.13)$$

$$\sigma_h = \frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{(r_o^2 - r_i^2)} - \frac{(P_o - P_i)r_i^2 r_o^2}{r^2(r_o^2 - r_i^2)} \quad (4.14)$$

donde:

P_o : Presión externa (lb / pg²)

P_i : Presión interna (lb / pg²)

r_o : Radio externo de la tubería flexible (pg)

r_i : Radio interior de la tubería flexible (pg)

$r_i > r < r_o$

Debido a que los esfuerzos máximos siempre se presentan en el interior y exterior de la tubería flexible de las ecuaciones 4.13 y 4.14 se tiene que:

para $r = r_i$

$$\sigma_r = -P_i \quad (4.15)$$

$$\sigma_h = \frac{(r_o^2 + r_i^2)P_i - 2r_o^2 P_o}{(r_o^2 - r_i^2)} \quad (4.16)$$

Cuando los esfuerzos se presentan en el exterior de la tubería, es decir:

Para $r = r_0$

$$\sigma_r = -P_o \quad (4.17)$$

$$\sigma_h = \frac{(r_o^2 + r_i^2)P_i - 2r_o^2P_o}{(r_o^2 - r_i^2)} \quad (4.18)$$

El límite de deformación, se basa en la combinación de estos esfuerzos de presión ocasionando que el material de la tubería flexible comience a deformarse.

- Esfuerzo de torsión

El esfuerzo de torsión de la tubería flexible se presenta en el extremo inferior de la tubería flexible al momento en que la barrena hace contacto con la formación.

TEORÍA DE "HENKY VON - MISES" ²

Se utiliza generalmente para determinar la resistencia al colapso de la tubería flexible con respecto a las cargas de tensión. Los cálculos de la teoría de distorsión de energía máxima, se hacen considerando:

- Especificaciones de la resistencia a la cedencia del material
- Espesor de pared de la tubería
- Diámetro exterior

Con estos datos se genera una elipse de los esfuerzos a los que se somete la tubería flexible (axial, radial, circunferencial) haciendo una predicción del comportamiento de la resistencia al colapso y estallamiento de la tubería.

La **Figura 4 - 4** nos muestra los esfuerzos a los que se somete una tubería cuando esta sujeta a cargas de tensión (2do y 3er cuadrante). El primer y cuarto cuadrante es la elipse de esfuerzos que define los límites de estallamiento y presión al colapso sobre la compresión.

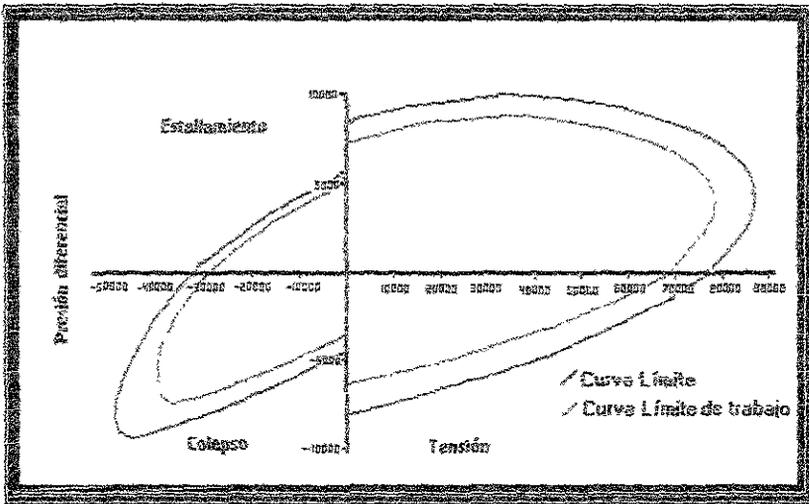


Figura 4 – 4 Límites de la tubería flexible (Compañía Petrotec)

Cuando no se tienen cargas de tensión en la tubería, la resistencia al colapso teóricamente es la máxima.

Los cálculos de la teoría de la distorsión de energía máxima generalmente se hacen al 100 % de un mínimo de esfuerzo a la cedencia del acero. Aplicando cargas de tensión aproximadas al mínimo de cedencia de la resistencia al colapso de la tubería flexible hasta cero.

Desafortunadamente, esta teoría no considera los efectos de ovalidad o defectos en la superficie de la tubería por lo que no se podrá determinar la resistencia al colapso, al disminuir el grado de ovalidad.

Podemos tener datos más decisivos sobre el comportamiento físico de la tubería, realizando pruebas continuas a las condiciones de operaciones típicas de servicio.

IV.2 PANDEO DE LA TUBERÍA FLEXIBLE ^{1,2,4,13,14,15,16,17,19,1*}

Un factor muy importante que causa el pandeo de la tubería es la fuerza de compresión aplicada a una sarta, esto puede ocurrir en cualquier sección del pozo (vertical, horizontal e inclinado), la carga de compresión es diferente para cualquier sección del pozo.

La **carga crítica por pandeo** representa el límite de la penetración horizontal y en ocasiones en secciones verticales para la tubería flexible, la cuál podría fallar si la carga sobrepasa éste límite.

Existen 2 tipos de pandeo:

1. Pandeo Senoidal
2. Pandeo Helicoidal

PANDEO PARA POZOS VERTICALES

Pandeo senoidal.

Si la carga de compresión desde la superficie excede la carga de pandeo crítica, la tubería comienza a pandearse y por lo tanto ocurre en pandeo senoidal, y se determina de la siguiente manera:

$$F_{cr, sen} = 1.94^3 EI W_e^2 \quad (4.19)$$

donde:

E : Módulo de Young, (30×10^6 (lb / pg²))

I : Momento de inercia de la sección transversal de la tubería, (pg⁴).

W_e : Peso del tubo en el lodo, (lb/pg)

Pandeo helicoidal

Para aumentar la fuerza crítica compresiva para el pandeo helicoidal se considera lo siguiente:

- Al incrementar el diámetro de la tubería flexible (OD)
 - ❖ Rigidez (EI). (↑) Aumenta,
 - ❖ Peso (W). (↑) Aumenta,
 - ❖ El espacio anular. (↓) Disminuye.

- Al incrementar el espesor de pared de la tubería flexible
 - ❖ Rigidez (EI). (↑) Aumenta,
 - ❖ Peso (W). (↑) Aumenta,

- Al disminuir la flotación
 - ❖ El peso de la TF , (↑) Aumenta.

La carga por pandeo helicoidal se calcula:

$$F_{helicoidal} = 5.55^3 EIW_e^2 \quad (4.20)$$

donde:

E : Módulo de Young, (lb / pg²).

I . Momento de inercia de la sección transversal de la tubería, (pg⁴)

W_e : Peso del tubo en el lodo. (lb/pg).

La parte superior de la tubería en el pozo vertical se encuentra en tensión y permanece recta, para que ocurra el pandeo helicoidal, las cargas compresivas tendrán que incrementarse y por lo tanto la tubería comenzará a tener una forma de hélice o espiral como se muestra en la **Figura 4 – 5**.

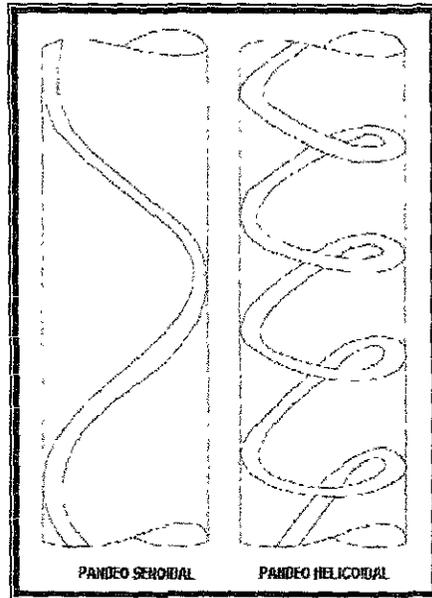


Figura 4 – 5 Pandeo de la tubería flexible en una sección vertical

PANDEO PARA POZOS HORIZONTALES

Pandeo senoidal

En pozos horizontales la tubería flexible está bajo compresión debido a la carga aplicada sobre la barrena o a la fuerza de fricción. Cuando la carga compresiva excede la carga de pandeo crítica F_{cr} , ocurre el pandeo senoidal, el cual se determina con la siguiente ecuación:

$$F_{cr} = 2 \sqrt{\frac{EIW_e \text{ sen } \theta}{r_c}} \quad (4.21)$$

donde:

F_{cr} : Carga axial crítica cuando inicia el pandeo senoidal, (lbf).

E : Módulo de Young, (30×10^6 lb / pg^2).

I : Momento de inercia de la sección transversal de la tubería, (pg^4).

r_c : Espacio anular entre la tubería y las paredes del agujero, (pg).

θ : Inclinación del agujero, (grados).

W_o : Peso del tubo en el lodo, (lb/pg).

EI : Rigidez de la tubería, (lb - pg^2).

Pandeo helicoidal

Si la carga compresiva axial se incrementa arriba de este valor, ocurrirá el pandeo helicoidal F_{hel} , y se determina de la siguiente forma:

$$F_{helicoidal} = 2\sqrt{2} \left[\frac{EIW_o \text{Sen}\theta}{r_c} \right]^{1/2} \quad (4.22)$$

La carga de pandeo helicoidal es 1.8 veces mayor que la carga de pandeo senoidal (F_{cr}) para pozos horizontales.

La carga compresiva se incrementa exponencialmente después del pandeo helicoidal debido a la fuerza adicional de contacto, que se genera entre la pared del pozo y la tubería pandeada helicoidalmente. **Figura 4 - 6.**

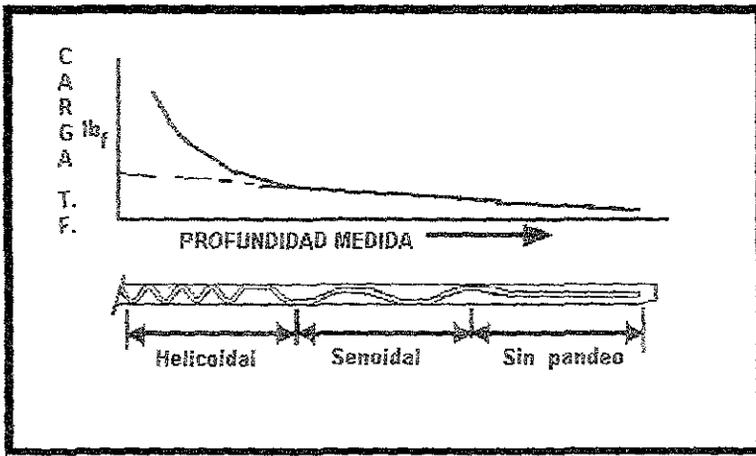


Figura 4 - 6 Pandeo de la tubería en pozos horizontales

PANDEO PARA POZOS DIRECCIONALES

En secciones con incremento de ángulo, la tubería bajo carga compressiva va a ser empujada contra la parte inferior del pozo antes de que comience el pandeo helicoidal o senoidal. **Figura 4 - 7.**

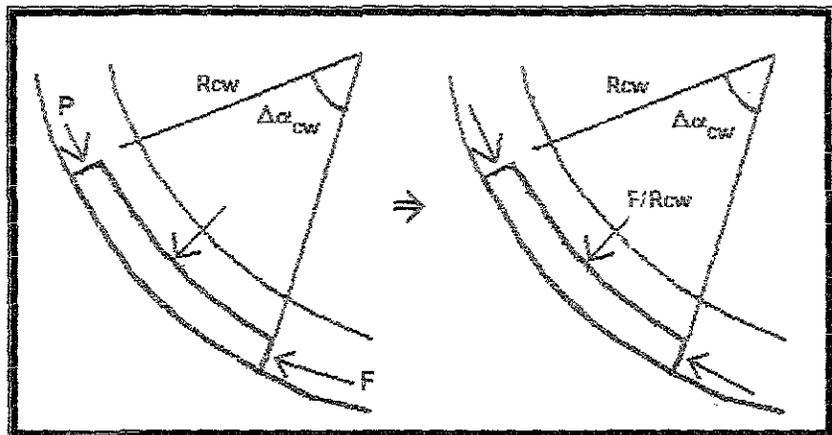


FIG 4 - 7 Fuerzas equivalentes distribuidas sobre la tubería de un pozo direccional

La fricción inicial se desarrolla cuando la tubería flexible es introducida dentro de un pozo horizontal y se localiza en el lado inferior del agujero. El valor de la fricción está en función del peso de la tubería, el ángulo de desviación y la fuerza resultante del empuje de la tubería.

El pandeo helicoidal produce otro tipo de resistencia por fricción en la tubería dentro del pozo; causando un incremento rápido en la resistencia a la fricción en la tubería.

Debido a esto, el pandeo en la sección inclinada, no va a ocurrir a menos que la carga compresiva axial sea muy alta, para predecir si es pandeo senoidal o helicoidal en la sección del incremento de ángulo se emplearan las siguientes ecuaciones:

Para pandeo senoidal:

$$F_{cr} = \left[\frac{4EI}{RR_{cw}} \right] \left[1 + \frac{RR_{cw} W_e \text{sen} \theta}{4EI} \right] \quad (4.23)$$

Para pandeo helicoidal:

$$F_{cr} = \left[\frac{12EI}{RR_{cw}} \right] \left[1 + \frac{RR_{cw} W_e \text{sen} \theta}{8EI} \right] \quad (4.24)$$

En casos reales, se han utilizado cargas mayores al límite senoidal, para empujar exitosamente la tubería dentro del agujero. En general, los eventos del pandeo son más pronunciados en secciones horizontales que en pozos verticales.

La fricción actúa oponiendo resistencia mientras la sarta es corrida en el agujero y además reduce el peso efectivo en la sección vertical. Debido a que el peso de la tubería en la sección vertical normalmente proporciona la fuerza necesaria para introducirla al agujero, una reducción en su peso efectivo puede reducir la longitud máxima al correr la tubería en la sección horizontal.

La fuerza de flotación puede provocar pandeo en la tubería al introducirla en una sección horizontal del pozo.

El pandeo no ocurrirá si la sarta es sacada del agujero una vez que se haya estabilizado en alguna sección del pozo al someterla a una carga de compresión.

Una vez ocurrido el pandeo helicoidal si se excede el peso en la superficie, se formará un candado ("LOCKUP") en el fondo del pozo y esto evitara que la tubería avance.

Para el cálculo de las ecuaciones anteriores, es importante saber como calcular el peso flotado, espacio anular, el momento de inercia, etcétera. Si estos no son dados como datos.

PESO FLOTADO (W_e)

Lubinsky demostró que no ocurrirá pandeo si no se utiliza todo el peso flotado de los Lastrabarrenas (LB) disponibles a la barrena.

Existen varias formas de determinar el peso flotado de los Lastrabarrenas.

- Introducir la sarta al pozo y leer el indicador de peso.
- Calcular el peso del volumen de fluido desplazado y restarlo del peso en el aire de los Lastrabarrenas.
- Multiplicar el peso en el aire de los Lastrabarrenas por el factor de flotación.

El factor de flotación es dado por:

$$F_b = 1 - \frac{\rho_m}{65.5} \quad (4.25)$$

donde:

ρ_m : densidad del fluido de perforación, (lb/gal).

ρ_a : densidad del acero (65.5 lb/gal).

En el sistema Internacional:

$$F_b = 1 - \frac{\rho_m}{7.86} \quad (4.26)$$

donde:

ρ_m : densidad del fluido de perforación, (gr / cm³).

ρ_a : densidad del acero, (7.86 gr / cm³).

El peso disponible a la barrena (PDB), utilizando el método del factor de flotación, es el peso flotado de los LB en el fluido a utilizar, es decir:

$$PDB = W_{LB} F_b \quad (4.27)$$

La longitud de los lastrabarrenas para obtener el peso sobre barrena adecuado es:

$$L_{LB} = \frac{PDB}{F_b W_{LB}} \quad (4.28)$$

donde:

L_{LB} : Longitud del lastrabarrena, (pies).

PDB : Peso sobre barrena deseada, (lb).

F_b : Factor de flotación, (adimensional).

W_{LB} : Peso del lastrabarrena en el aire, (lb/pie).

En el Sistema Internacional:

$$L_{LB}(m) = [0.3048] \frac{PDB(lb)}{F_b W_{LB}(lb / pies)} \quad (4.29)$$

Otra ecuación es utilizada para el cálculo del peso flotado:

$$W_e = W_{aire} - \frac{\rho_L A_L - \rho_o A_o}{24.5}; \text{ (lb/pie)} \quad (4.30)$$

donde.

$W_{aire} = 1.836 \text{ lb/pie}$

$A_L = (\pi/4)(OD - 2t)^2 = (\pi/4)(ID)^2 ; \text{ (pg}^2\text{)}$

$A_o = (\pi/4)(OD)^2 , \text{ (pg}^2\text{)}$

Para el cálculo del momento de inercia se tiene la siguiente ecuación:

$$I = \frac{\pi}{64} \left[OD^4 - (OD - 2t)^4 \right] \quad (4.31)$$

donde:

t : Espesor de pared de la tubería flexible, (pg).

OD : Diámetro exterior de la tubería flexible, (pg)

Para calcular el espacio anular (r_c), se tiene:

$$r_c = \frac{ID_{\text{agujero}} - OD}{2} \quad (4.32)$$

EJEMPLO PRÁCTICO PARA PANDEO HELICOIDAL EN POZOS HORIZONTALES

Si tenemos un ángulo de inclinación de 80°, diámetro del agujero de 5 pg, peso flotado de la TF en el lodo de perforación de 1.082 lb / pies, y diámetro exterior de la TF 1.50 pg x .125 pg de espesor.

SOLUCIÓN

La ecuación a emplearse es la siguiente.

$$F_{\text{helicoidal}} = 2 \cdot 2 \left[\frac{EIW_e \text{Sen}\theta}{r_c} \right]^{1/2}$$

$$W_e = 1.082 \text{ lb/pie} = 1.082 \text{ lb}/(12\text{pg}) = .09016 \text{ (lb/ pg)}$$

Calculando el momento de inercia y el claro radial.

$$I = \frac{\pi}{64} [OD^4 - (OD - 2t)^4] = \frac{\pi}{64} [1.50^4 - (1.50 - 2(.125))^4] = .1286(\text{pg}^4)$$

$$r_c = \frac{ID_{\text{hole}} - OD}{2} = \frac{5 - 1.5}{2} = 1.75(\text{pg})$$

Por lo tanto la fuerza de pandeo helicoidal es.

$$F_{\text{helicoidal}} = 2 \cdot 2 \left[\frac{EIW_e \text{Sen}\theta}{r_c} \right]^{1/2} = 2 \cdot 2 \left[\frac{(30 \times 10^6) (.1286) (.09016) (\text{sen } 80)}{1.75} \right] = 1252(\text{lb}_f)$$

Ahora se presenta una tabla de la fuerza crítica compresiva (pandeo helicoidal), tomando en cuenta su diámetro externo y espesor de pared de la TF :

Diámetro Exterior (pg)

Espesor de pared (pg)	1 500	*1.750	*2.000	*2 375
0 125	1252	1714	2230	3068
*0 134	1353	1868	2452	3433
*0 156	1587	2224	2967	4274
*0 175	1775	2513	3385	4957

* El cálculo para obtener estos resultados se hace exactamente como se mostró en el ejemplo anterior

CAPÍTULO V

CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE FLUIDOS E HIDRÁULICA

V.1 FLUIDOS PARA LA PERFORACIÓN CON TUBERÍA FLEXIBLE^{1,3,20}

Los fluidos que se utilizan para la perforación con tubería flexible, son los mismos que se utilizan para la perforación convencional, es decir, son lodos a base de polímeros y a base de salmueras libres de sólidos; también se pueden utilizar lodos a base de aceite, pero éstos no son recomendables debido a que dañan los sellos (elastómeros) del motor de fondo y el MWD.

Los fluidos para la perforación deben cumplir las siguientes funciones:

- Mantener la presión del yacimiento.
- Mantener la estabilidad del agujero.
- Sacar los recortes del fondo hacia la superficie.
- Evitar el daño a la formación.
- Suministrar la potencia necesaria al motor de fondo.
- Permitir la toma de registros.
- Enfriar, lubricar y limpiar la barrena.

Las propiedades de los fluidos que deben ser considerados y que pueden afectarse seriamente, cuando no se hace una buena selección de los fluidos, debido a las características reológicas de las formaciones que se atravesarán durante la perforación de pozos son:

- Viscosidad
- Densidad
- Tixotropía
- Contenido de sólidos
- Salinidad
- PH

Otro aspecto muy importante que debe tomarse en cuenta para la selección de los fluidos de perforación, es la presencia de lutitas o formaciones con alto contenido de arcillas, ya que estas son sensibles a la humectación y sufren hinchamiento al contacto con el agua, lo que ocasiona una reducción en el diámetro del agujero, y esto puede traer problemas, ya que puede quedar atrapada la tubería y por lo tanto se tendría que abandonar el pozo, pues las operaciones de pesca en estas condiciones son difíciles.

Al estar perforando con motores de fondo bajo el sistema de medición continua (MWD), los fluidos con alto contenido de sólidos ocasionan un deterioro en los sellos de estos equipos, por lo que se recomienda utilizar fluidos a base de polímeros, aunque sean más costosos. Pero esto se compensa al evitar el número de viajes de la sarta para intercambiar de aparejo de fondo, que en comparación con equipos deteriorados ocasiona mayor inversión y perder el control de la dirección del pozo.

Un factor muy importante para la selección de los fluidos de perforación con tubería flexible, es diseñar un fluido que provoque menos caídas de presión por fricción. Cuando los fluidos pasan a través de conductos muy estrechos como lo es el caso de la tubería flexible y espacios anulares pequeños, estas caídas de presión son muy altas, por lo que para reducir estos efectos es necesario el empleo de fluidos adelgazantes o programas de bombeo con poco gasto, a fin de evitar derrumbes en las paredes del pozo por la turbulencia del flujo.

Se concluye que para la perforación de pozos con tubería flexible, es conveniente el diseño y uso de un fluido que cumpla eficazmente sus funciones, para optimizar la perforación.

Sistemas de fluido para molienda y perforación ²³

Las presiones de bombeo reducidas, la fricción al contacto con las paredes y un adecuado transporte de sólidos son críticos para la perforación con tubería flexible. Los fluidos a base de biopolímeros se utilizan en operaciones de perforación con tubería flexible, estos exhiben excelentes propiedades reológicas y su costo es efectivo.

Fluido para moler la ventana.

Un biopolímero del tipo "welan" es utilizado durante el proceso de salida de la TR. El biopolímero ayuda en la remoción de recortes y reduce las presiones de circulación.

El biopolímero no es afectado por la cantidad de cemento introducido en el sistema mientras se muele el agujero piloto; los recortes y las limaduras de metal generados son pequeños y rápidamente transportados por el fluido. El metal que entra en el fluido de molienda puede dañar el equipo en la superficie y de fondo, en particular el estator del motor y el ensamble radial de baleros. Para ayudar en la remoción de la limadura de metal durante las operaciones de molienda, el retorno del fluido es pasado sobre una serie de imanes y una temblorina de movimiento lineal.

Un fluido estable y una presión de bombeo constante es la clave para monitorear el trabajo del motor de fondo y determinar el progreso de la operación de molienda de la ventana. El proceso de molienda de la ventana frecuentemente requiere de 10 a 12 horas.

Sistema de fluido de perforación.

Un sistema de biopolímeros xanthana grado premium libre de sólidos es utilizado para perforar las secciones del agujero descubierto; la introducción del sistema a la operación con TF ha resultado en incrementos grandes en el alcance horizontal, limpieza mejorada del agujero y estabilidad de la formación. Las elevadas viscosidades a baja velocidad de corte proporcionan un transporte efectivo de recortes en la sección horizontal.

Lo más importante es que el enjarre de los sólidos perforados es minimizado y se reducen las tendencias por pegadura diferencial, manteniendo rigurosamente el nivel de sólidos alrededor del 1%. La pérdida de fluido es controlada por la penetración de filtrado viscoso dentro de la formación ya que el filtrado sostiene una presión diferencial entre el agujero y la formación.

La corriente de retorno del flujo del lodo es procesada continuamente a través de temblorinas de movimiento lineal y centrifugas de alta velocidad mientras se esta perforando; aún con este tratamiento de limpieza riguroso, los sólidos pueden acumularse en el fluido que en exceso del 1%, frecuentemente resultan una pegadura diferencial en las secciones horizontales. Un nuevo sistema de fluido xanthana es introducido al inicio de cada sección horizontal y se desecha el fluido utilizado en la sección de construcción, después de terminar la sección horizontal el sistema utilizado es almacenado para perforar la sección de construcción del siguiente pozo para reducir costos. El fluido xanthana no se utiliza durante la salida de la TR debido a que es susceptible a contaminarse con cemento.

Los lubricantes base alcohol han sido utilizados en combinación con el sistema biopolímero xanthana para mejorar el peso sobre barrena, ya que adiciones de 1.5% de lubricante eliminaron la fricción inducida por el pandeo helicoidal en la tubería flexible. El lubricante aparentemente reduce la fricción metal a metal lo cual mejora la transferencia de peso, incrementando la velocidad de penetración en 400% en este caso.

El fluido "Xanthana" como el sistema "welan" presentan presiones de circulación reducidas en comparación con los sistemas convencionales de fluidos de perforación base-agua. Esta reducción en las presiones mejoran el ciclo de vida de la tubería flexible, así como la hidráulica para el comportamiento del motor y la limpieza del agujero; sin embargo las presiones de circulación se incrementan con el tiempo a medida que el pozo es perforado, debido a la degradación de polímeros y el incremento del contenido de sólidos.

En la tabla 4 se muestran las propiedades del biopolimero Xanthana Premium.

Tabla 4 propiedades del fluido Xanthana Premium

BIOPOLIMERO XANTHANA	VALORES PROMEDIO
Densidad	8.9 lb/gal
Viscosidad Plástica	10 cp
Punto de Cedencia	47 lb/100 ft ²
Pérdida de filtrado	5.6 cc
Concentración de sólidos	0.6%
Concentración de arena	0.0%
Concentración de Clorito	44,500 ppm
Viscosidad aparente	60,000 cp

V.2 HIDRÁULICA ¹

Para la hidráulica de la tubería flexible se deben considerar Pérdidas de presión por fricción, factor de fricción hidráulico, modelos de flujo, número de Reynolds, flujo de fluidos y los efectos de la curvatura sobre las pérdidas de presión.

Las pérdidas de presión por unidad de longitud, se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta P}{L} = f_H \left(\frac{2\rho V^2}{OD - 2t} \right) \quad (5.1)$$

donde:

f_H : factor de fricción hidráulico.

ρ : densidad del fluido, (lb/pie³)

V : velocidad del fluido, (pies/seg)

t : espesor de pared, (pg)

L : longitud de la TF, (pies)

A : Área de flujo. $A = .25\pi(OD - 2t)^2$, (pies²)

Por lo tanto de esta ecuación se puede despejar el factor de fricción hidráulico y calcularlo:

$$f_H = \left(\frac{(OD - 2t)(\Delta P)}{(L)(2\rho V^2)} \right) \quad (5.2)$$

Para el modelado del factor de fricción hidráulico se debe:

- Seleccionar el modelo de flujo
 - ❖ Newtoniano
 - ❖ Ley de potencias
- Calcular el número de Reynolds, N_{RE}
- Determinar el régimen de flujo, (flujo laminar o turbulento)
- Calcular el factor de fricción hidráulico.

MODELOS DE FLUJO¹

MODELO NEWTONIANO

Este modelo representa a los fluidos ideales, es decir, caracteriza a aquellos fluidos cuya relación entre el esfuerzo y velocidad de corte es lineal.

Para fluidos newtonianos se tiene la siguiente expresión:

$$\tau = \mu \times \gamma \quad (5.3)$$

donde:

τ : Esfuerzo de corte.

μ : Viscosidad absoluta.

γ : Velocidad de corte.

Para calcular el Número de Reynolds se tiene la siguiente expresión:

$$N_{RE} = \frac{V \times ID \times \rho}{\mu} \quad (5.4)$$

donde:

ID : Diámetro interior, (pies).

V : Velocidad de flujo, (pies/seg).

ρ : Densidad del fluido, ($\rho_{\text{agua}} = 62.83 \text{ lb/pies}^3$).

μ : Viscosidad absoluta, ($\mu_{\text{agua}} = 6.72 \times 10^{-4} \text{ lb/pies-seg}$).

Una vez que se calculó el Número de Reynolds podremos saber el tipo de régimen de flujo:

- $N_{RE} < 2100$; flujo laminar
- $N_{RE} > 2900$; flujo turbulento

Para unidades prácticas de campo se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\tau = \left(\frac{1}{478.69} \right) \mu \gamma \quad (5.5)$$

$$\theta = \left(\frac{1}{510.76} \right) \mu \gamma \quad (5.6)$$

$$\mu = 478.69 \frac{\tau}{\gamma} \quad (5.7)$$

$$\mu = 300 \frac{\theta}{N} \quad (5.8)$$

donde:

τ : Esfuerzo cortante, (lb/100 p²).

γ : Velocidad de corte, (seg⁻¹).

θ : Lectura del Viscosímetro Fann, (en grados).

μ : Viscosidad, (cp).

MODELO DE OSTWALD – DE WAELE

Este modelo también es conocido como el modelo de LEY DE POTENCIAS y se expresa de la siguiente forma:

$$\tau = K \times \gamma^n \quad (5.9)$$

donde el índice de consistencia K, es un término semejante a la viscosidad, es decir, si el valor K es alto, el fluido es más “viscoso” o viceversa.

n, es el índice de comportamiento de flujo y se tiene que:

- $n < 1$, pseudoplástico.
- $n = 1$, Newtoniano.
- $n > 1$, dilatante.

Para el cálculo del Número de Reynolds se tiene la siguiente expresión:

$$N_{RE} = \frac{\rho V^{(2-n)} (OD - 2l)^n}{K \left[8^{(n-1)} \right]} \left[\frac{4n}{3n+1} \right]^n \quad (5.10)$$

$N_{RE} < (3470 - 1370n)$; flujo laminar.

$N_{RE} > (4270 - 1370n)$; flujo turbulento.

Para unidades prácticas de campo se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\tau = 1.067 K \gamma^n \quad (5.11)$$

$$\theta = K (1.703 N)^n \quad (5.12)$$

$$\mu = 510.76 K \gamma^{n-1} \quad (5.13)$$

$$\mu = 510.76 K (1.703 N)^{n-1} \quad (5.14)$$

Estos son los modelos más utilizados en la Industria Petrolera para conocer las propiedades de los fluidos

FACTOR DE FRICCIÓN HIDRÁULICO

PARA TUBERÍA RECTA

El cálculo del factor de fricción hidráulico (f_{HS}), se expresa de la siguiente forma:

$$f_{HS} = \frac{a}{N_{RE}^b} \quad (5.15)$$

donde:

$$a = 16$$

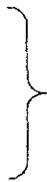
$$b = 1.0$$



Flujo laminar

$$a = \frac{\log_{10} n + 3.93}{50}$$

$$b = \frac{1.75 - \log_{10} n}{7}$$



Flujo turbulento

Estas expresiones se utilizan para el cálculo de fluidos Newtonianos ($n = 1$) y para el modelo de Ley de Potencias

FACTOR DE FRICCIÓN EN EL CARRETE

Para el cálculo del factor de fricción hidráulico (f_{HC}), se tienen las siguientes expresiones:

$$f_{HC} = \frac{0.084}{N_{RE}^{0.2}} \left[\frac{OD - 2t}{D_{carrete}} \right]^{0.1} ; \text{ Para fluidos Newtonianos} \quad (5.16)$$

$$f_{HC} = \frac{1.069a}{N_{RE}^{0.8b}} \left[\frac{OD - 2t}{D_{carrete}} \right]^{0.1} ; \text{ Para Ley de Potencias} \quad (5.17)$$

CASO PRÁCTICO

CASO PRÁCTICO 3

INTRODUCCIÓN

Antes de construir una reentrada con tubería flexible, se deben analizar los campos que tengan mayores posibilidades de éxito y que el proyecto sea factible técnicamente.

Selección del pozo candidato.

Para la selección del pozo candidato, se debe analizar:

- Historia de producción y reparación
- Estado mecánico.
- Registros geofísicos de la zona productora, y la posible forma de intervención.
- Sección geológica y estructural del pozo.
- Número de tuberías de revestimiento a perforar al abrir la ventana.
- Temperatura y presión de fondo en el intervalo productor
- Fluido de perforación a utilizar.

Factibilidad técnica del proyecto.

Para llevar a cabo la operación con éxito, debemos asegurarnos que la tubería flexible cumpla con las especificaciones que recomienda el fabricante y considerar sus límites en los trabajos de perforación como:

- Diámetro de la tubería

Como el diámetro de la tubería flexible es pequeño, la velocidad de flujo que pueda alcanzar dentro y fuera de la tubería puede ser limitada.

- Espesor de pared

Aunque el espesor de pared de la tubería flexible y la tubería convencional pueda ser el mismo, los valores de la resistencia al torque y compresión no pueden compararse.

- Profundidad del agujero

La profundidad al trabajar con tubería flexible es una limitante debido a la tensión que se le pueda aplicar. Adicionalmente, los esfuerzos pueden también limitar el alcance debido a la deformación senoidal y helicoidal.

La técnica para realizar los trabajos de perforación con tubería flexible y asegurar que el proyecto sea factible es el siguiente.

1. Seleccionar el diámetro de la tubería flexible, el diámetro del agujero, fluido de perforación y el ensamble de fondo.
2. Calcular el peso y el tamaño del carrete, si puede ser transportado y si no regresar al punto 1.
3. Calcular los esfuerzos de la tubería para asegurar que nunca exceda del 80% del esfuerzo a la cedencia y el mínimo aceptable en el agujero que se pueda proveer en el fondo del pozo. Además, incluir la fracción asociada con la flexión en el ensamble de fondo, alrededor y en las curvas. También asegurar que la cabeza inyectora pueda suministrar el jalón necesario, así como el empuje y la capacidad para jalar la tubería flexible y el ensamble de fondo fuera del agujero. Si estas condiciones no se cumplen, reconsiderar el paso 1.
4. Calcular la caída de presión del fluido de perforación en la tubería flexible, en el ensamble de fondo y espacio anular al 100 % de la capacidad de flujo del motor y determinar la presión absoluta de la tubería flexible durante la perforación; si ésta presión es mayor que la presión máxima de trabajo disponible, regresar al paso 1 para reconsiderar las características señaladas.
5. Calcular la fatiga y la vida útil de la tubería flexible para la presión calculada anteriormente. Si la tubería flexible no cumple para determinar el trabajo completo, regresar al paso 1 para satisfacer las necesidades del cálculo en este punto.

- Determinar si el fluido de perforación puede acarrear los recortes fuera del agujero de la tubería de revestimiento; cuando la perforación se encuentra en un 80 % del máximo ritmo del flujo del motor, de no ser así reconsidere el paso 1, ya que la longitud de la tubería flexible es limitada por el tamaño del carrete y el peso.

POZO CANDIDATO: CANTARELL 2077

ANTECEDENTES

En la última intervención del pozo (1981), se realizó una reentrada con equipo convencional en una T. R. de 9 5/8"; con objetivo a perforar la Brecha del Paleoceno. Debido a que en la operación se presentó una pérdida total de circulación, parte de la sarta quedó atrapada y posteriormente se intentó recuperarla.

Finalmente, se abandonó el pozo con la sarta atrapada y tres tapones de cemento, como se muestra en la **Figura C - 1**.

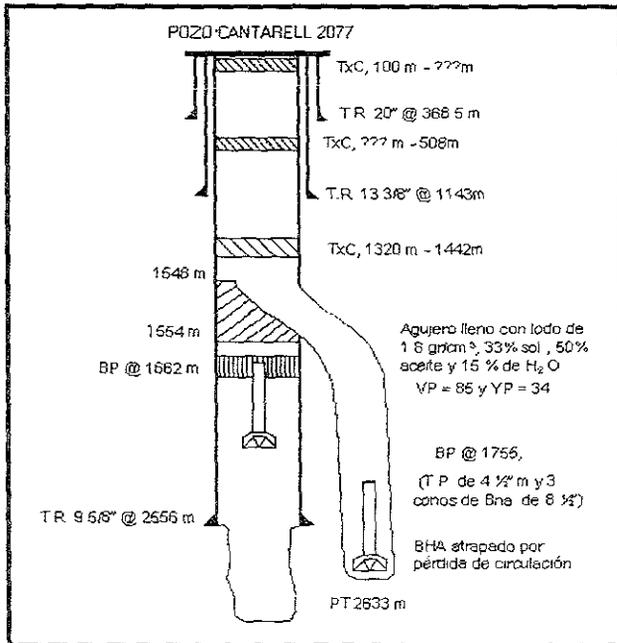


Figura C - 1 Estado mecánico actual

PROPUESTA

El objetivo es aplicar la técnica de la tubería flexible para realizar una ventana en una T. R de 9 5/8", que de acuerdo con los registros geofísicos el objetivo a perforar será el Eoceno Medio para recuperar el pozo y posteriormente reincorporarlo a la producción.

La cima de la formación se encuentra a 1852 m (MV) y la base a 1921m (MV), con una inclinación de 42° con desplazamiento de 463m.

La operación consiste en moer los tapones de cemento, bajar y anclar la cuchara para abrir la ventana en la T. R. de 9 5/8" y perforar un agujero de 6 3/4" a partir del punto de inicio de desvío (KOP) a una profundidad de 1355.1 MV (1500 MD) como se muestra en la siguiente **Figura C - 2**.

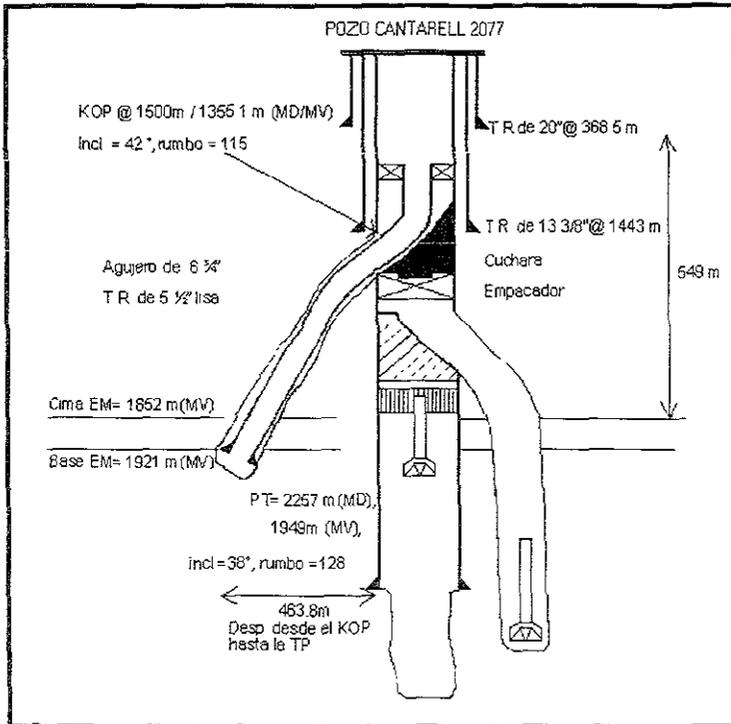


Figura C - 2 Estado mecánico propuesto

MÉTODO DE DESVÍO Y CONTROL DIRECCIONAL

Para realizar la apertura de la ventana y la perforación direccional, se realizó una corrida de cómputo, donde se graficó el plano direccional y el desplazamiento horizontal respecto a la profundidad como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4 Análisis de desvío y control direccional

	Prof. Medida (mKB)	Incl. (grad)	Azmut (grad)	Sección Vertical (m)	Prof. Verd (mKB)	Despl. Horizon (m)	Orientación (+E/-O) (m)	Latitud (+N/-S) (m)	Severidad (grad/30m)	Vel de Const (grad/30m)
KOP	1500	42	118	462.5	1355.1	465.9	421.9	-190.2	0	0
	1529	42	115	481.9	1376.7	485.3	439.3	-198.9	2	0
	1559	40	120	501.5	1399.3	505	456.7	-207.9	3.8	-2
	1589	38	128	519.9	1422.6	523.9	472.4	-218.5	5.4	-2
PT	2257	38	128	920.6	1949	935.1	796.4	-471.7	0	0

A continuación la figura C – 3, se muestra la vista en planta de la reentrada para el pozo C-2077.

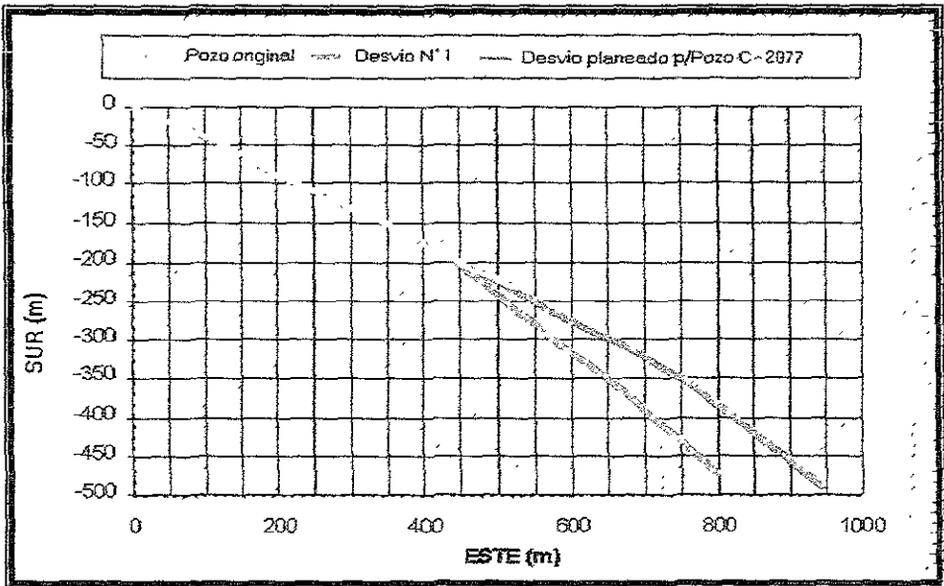


Figura C - 3 Vista en planta de la reentrada del pozo C-2077

La siguiente figura C - 4, nos muestra la profundidad y desplazamiento horizontal de la reentrada del pozo.

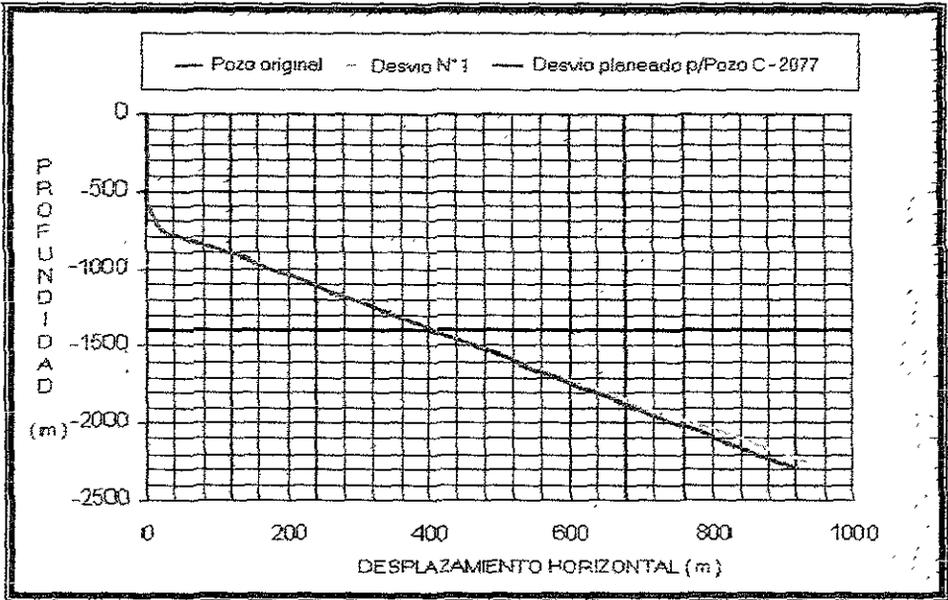
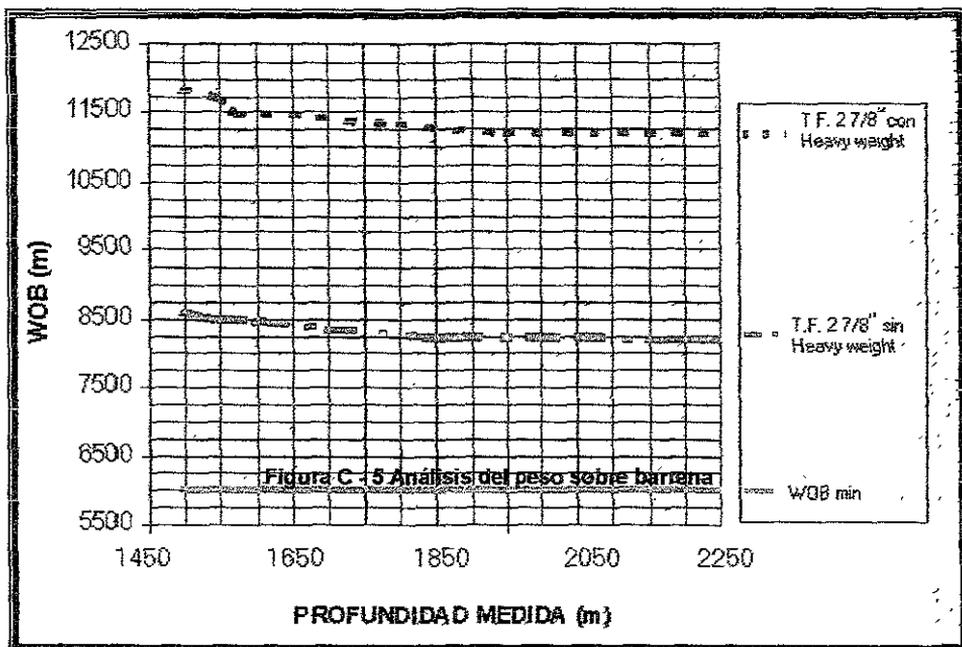


Figura C - 4 Profundidad y desplazamiento horizontal

PESO SOBREBARRENA Y ALCANCE HORIZONTAL

Se hizo el cálculo del peso sobre barrena con base al alcance direccional del pozo y debido a que no se encuentran dificultades en la transmisión del peso sobre barrena, se decidió utilizar un ensamble de fondo sin lastrabarrena como se muestra en la figura.



ENSAMBLE DE FONDO

El ensamble de fondo a utilizar será el siguiente:

- 2700 m de tubería flexible de 2 7/8" X 0.190 de espesor (5.462 lb/pie) nueva
- Conector para la tubería flexible
- Válvula check doble
- MWD
- Junta no rotatoria
- Sustituto de circulación
- Motor de desplazamiento positivo de 4 3/4 " XP no magnético.
- Barrena tricónica de 6 3/4"

Especificaciones de la tubería flexible de 2 7/8"

- ⇒ Material HS – 80 (80,000 lb /pg² de resistencia a la cedencia)
- ⇒ Límite de jalón de 158,000 lb (0.190 de espesor) y sin aplicar factor de seguridad.
- ⇒ Límite de torsión de 7,438 lb – pie (0.190 de espesor) y sin aplicar factor de seguridad.

PROGRAMA DE LODOS E HIDRÁULICA

Se requiere un lodo que logre la limpieza del pozo entre la T. R. de 9 5/8" y la tubería flexible de 2 7/8" y que minimice el problema de alta presión y la potencia hidráulica para evitar el desgaste de las bombas y la fatiga de la tubería.

Consideraciones sobre la limpieza del pozo con tubería flexible

En la perforación convencional, la rotación de la sarta ayuda a la limpieza del pozo, principalmente en las secciones desviadas u horizontales, promoviendo agitación mecánica de los recortes. En la perforación con tubería flexible, además de los problemas de gastos limitados por las altas caídas de presión, no se puede rotar la sarta.

Una ventaja de la perforación con tubería flexible es que se pueden realizar viajes cortos con bombeo de fluido todo el tiempo, para inspeccionar la última sección perforada del pozo y aumentar la agitación mecánica de los recortes, lo que ayuda a la limpieza del pozo. Lo que torna la operación más segura y rápida.

Propiedades del fluido a utilizar:

Se ha diseñado un fluido base agua con alta reología para la perforación direccional. En este intervalo se esperan altos avances, por lo que se debe observar periódicamente durante la perforación, la presencia de arrastre, así como la fluctuaciones en la presión de bombeo.

Densidad	1.8 gr /cm ³
Sólidos	28 – 35 %
Geles	25 –40 lb/100 pies ²
V. Plástica	14 – 25 cp
P. Cedencia	35 –50 lb/100 pies ²
PH	9.5 –10

Recomendaciones para el intervalo

Será necesario circular cada vez que las condiciones de avance así lo indiquen, debido al alto volumen de recortes producidos que quedan en el espacio anular, circular con el gasto mínimo por tres minutos después de perforar cada 10 min.

PROCEDIMIENTO PARA LA APERTURA DE UNA VENTANA

1. Armar BHA 1: conector para TF, válvula check doble, desconector hidráulico, 5 lastrabarrenas de 4 ¾". Motor de 4 ¾" y barrena de 8 ½".
2. Moler primer tapón de cemento con un lodo base-aceite y bajar la tubería hasta el segundo tapón, molerlo y bajar hasta tercer tapón y molerlo.
3. Meter sarta hasta 1548 m y hacer una prueba de tracción cada 250 m, y circular para limpiar pozo.
4. Sacar sarta del pozo y desmantelar BHA 1.
5. Armar BHA 2, igual al BHA 1 pero con un escareador abajo del motor del fondo y otro en medio de los lastrabarrenas.
6. Meter TF con BHA 2 hasta 1548 m. Circular en el fondo para limpiar pozo, repasar sección donde se encontraron los tapones de cemento. Verificar que el pozo no se manifiesta.
7. Sacar TF y BHA 2 del pozo, desmantelar y mover cabeza inyectora.
8. Tomar registro de cementaciones y de revestimiento (USI), sacar herramienta de registro y montar BHA para bajar el empacador de la cuchara.
9. Meter el empacador guía de la cuchara con el equipo de línea de acero, asentar empacador, sacar línea de acero a superficie.
10. Meter línea de acero con registro Giroscópico para obtener la orientación del empacador base de la cuchara, sacar línea de acero y desmantelar equipo.
11. Armar BHA 3: conector para TF, válvula check doble, desconector hidráulico, 5 lastrabarrenas de 4 ¾", motor de fondo 4 ¾" XP, molino "Starting mill" y cuchara Meter hasta la cima del empacador.
12. Anclar cuchara, romper el perno, cambiar fluido y moler ventana guía.
13. Sacar BHA 3 del pozo cambiar molino "Starting mill" por "Window mill".
14. Meter BHA 4 (con Window mill) y moler ventana.
15. Sacar BHA 4 y cambiar por el BHA 5: conector para TF válvula check doble, desconector hidráulico, 5 lastrabarrenas de 4 ¾", motor de fondo 4 ¾" XP, molinos "Water mellon" y "Window mill".

16. Meter BHA 5, acondicionar para profundizar ventana y perforar 5 m en la formación y hacer prueba de goteo.
17. Sacar BHA 5 y cambiar para el BHA 6: conector para TF válvula check doble, desconector hidráulico, MWD, motor de fondo 4 ¾" XP, barrena 6 ¾"
18. Meter sarta hasta 1509 m. Probar el peso de la sarta en tracción, correlacionar profundidad con el registro de rayos gamma original.
19. Sacar sarta a superficie para cambio de barrena / motor. BHA 6 con barrena nueva @ 1585 m. *
20. Correlacionar profundidad, orientar cara de la herramienta y seguir perforando hasta 1661 m. *
21. Sacar sarta a superficie para cambio de barrena / motor. BHA 6 con barrena nueva @ 1661 m. *
22. Correlacionar profundidad, orientar cara de la herramienta y seguir perforando hasta 1737 m. *
23. Sacar sarta a superficie para cambio de barrena / motor. BHA 6 con barrena nueva @ 1737 m. *
24. Correlacionar profundidad, orientar cara de la herramienta y seguir perforando hasta 1813 m. *
25. Sacar sarta a superficie para cambio de barrena / motor. BHA 6 con barrena nueva @ 1813 m. *
26. Correlacionar profundidad, orientar cara de la herramienta y seguir perforando hasta 1889 m. *
27. Sacar sarta a superficie para cambio de barrena / motor. BHA 6 con barrena nueva @ 1889 m. *
28. Correlacionar profundidad, orientar cara de la herramienta y seguir perforando hasta 1965 m. *
29. Sacar sarta a superficie para cambio de barrena / motor. BHA 6 con barrena nueva @ 1965 m. *
30. Correlacionar profundidad, orientar cara de la herramienta y seguir perforando hasta 2041 m. *

31. Sacar sarta a superficie para cambio de barrena / motor. BHA 6 con barrena nueva @ 2041 m. *
32. Correlacionar profundidad, orientar cara de la herramienta y seguir perforando hasta 2117 m. *
33. Sacar sarta a superficie para cambio de barrena / motor. BHA 6 con barrena nueva @ 2117 m. *
34. Correlacionar profundidad, orientar cara de la herramienta y seguir perforando hasta 2193 m. *
35. Sacar sarta a superficie para cambio de barrena / motor. BHA 6 con barrena nueva @ 2193 m. *
36. Correlacionar profundidad, orientar cara de la herramienta y seguir perforando hasta 2257 m. *
37. Ya que se llegó al objetivo se comienza a circular para limpiar el pozo, se hace un viaje hasta la ventana para inspeccionar la condición del agujero. Y por último se repasa el pozo lentamente. *

* NOTA: Reducir la velocidad del aparejo de fondo al entrar o salir de la ventana.

La **figura C - 6**, ilustra el procedimiento anterior.

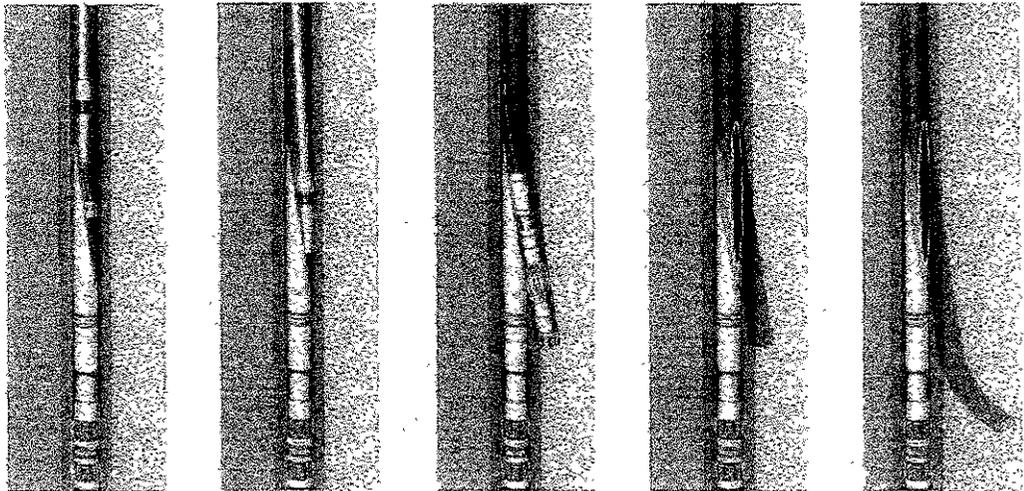


Figura C - 6 Pasos para la apertura de ventana ^{1*}

CONCLUSIONES
Y
RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- A nivel mundial se ha generalizado el uso de la tubería flexible en servicios a pozos como: limpieza, toma de registros, disparos, etc. Entre 1990 – 2000 se incrementó su empleo en la construcción de reentradas para recuperar pozos abandonados.
- La tecnología de tubería flexible en la perforación de pozos tiene algunas ventajas como: menor riesgo de contaminación, menos contacto físico del personal con el equipo de tubería flexible, alta seguridad al realizar viajes, pues se mantiene siempre el control del pozo, etc.
- La selección del pozo candidato es de capital importancia, es necesario seleccionar el caso “más simple”, con el propósito de asimilar la tecnología y construir de mejor forma la curva de aprendizaje.
- Si bien, se adopta la mayoría de los procedimientos de la perforación convencional, pero es importante desarrollar y adecuar los propios para el manejo de la tubería flexible.
- En nuestro país se hicieron 6 reentradas en la Región Norte con resultados alentadores. Es importante continuar desarrollando estos trabajos y aprovechar la experiencia.
- Los servicios de perforación con tubería flexible resulta menos competitiva económicamente en comparación con la convencional. Sin embargo, puede tener mayores alcances y flexibilidad, lo que puede hacerla atractiva a futuro. Es una opción más para recuperar pozos que han sido cerrados a la producción, o bien para abrir nuevos intervalos cercanos a un pozo existente.

RECOMENDACIONES

- Determinar los esfuerzos a los que se somete la tubería flexible, los cuales deberán ser analizados para conocer el efecto que se tendrá durante la perforación, minimizando el daño a la tubería como: ovalidad, estallamiento, colapso y resistencia a la cedencia.
- Seleccionar adecuadamente el tamaño del carrete y cuello de ganso de acuerdo al diámetro de la tubería que se esté utilizando.
- Evitar el exceso de sobre carga en la superficie para no llegar al efecto de candado o LOCKUP.
- Capacitar al personal que trabaja en servicios de tubería flexible en los procedimientos operativos de perforación, incorporar personal de perforación al grupo de trabajo, para que juntos construyan la curva de aprendizaje.

ANEXO

Tabla 1 Datos de la Tubería Flexible*

Diam Ext (pg)	Espesor (pg)	Diam Int (pg)	Area (pg ²)	Peso (lb/pe)	Cap. Carga "min,psi"	Cedencia "min,psi"	Colapso "min,psi"	Torque lb - pie	Capacidad bl/1000 pies
55,000 psi de esfuerzo a la cedencia									
0 750	0 083	0 548	0 174	0 519	9,570	12,000	13,100		0.331
1 000	0 083	0 834	0 239	0 813	13,150	9,100	9,900		0 676
1 250	0 083	1 084	0 304	1 034	16,740	7,300	7,900		1 141
1 500	0 095	1 310	0 419	1 426	23,060	6,900	7,800		1 667
1 750	0 095	1 560	0 494	1 679	27,170	6,000	6,500		2 364
70 ,000 psi de esfuerzo a la cedencia									
0 750	0 067	0 516	0 144	0 489	10,060	11,570	11,380	132	0 369
1 000	0 067	0 866	0 196	0 668	13,740	8,680	8,260	251	0 729
1 000	0 075	0 850	0 218	0 741	15,250	9,710	9,710	274	0 702
1 000	0 087	0 826	0 250	0 848	17,460	11,120	11,120	306	0 663
1 000	0 095	0 810	0 270	0 918	18,900	12,030	12,030	326	0 637
1 000	0 102	0 796	0 288	0 978	20,140	12,820	12,820	343	0 616
1 000	0 109	0 782	0 305	1 037	21,350	13,590	13,590	359	0 594
1 125	0 067	1 116	0 249	0 847	17,430	5,410	5,410	408	1 210
1 125	0 075	1 100	0 277	0 941	19,370	6,780	6,780	448	1 175
1 125	0 087	1 076	0 318	1 081	22,250	8,820	8,820	504	1 125
1,125	0 095	1 060	0 345	1 172	2 4120	9,830	9,830	540	1 091
1,125	0 102	1 046	0 368	1 251	25,750	10,490	10,490	570	1 063
1 125	0 109	1 032	0 391	1 328	27,350	11,140	11,140	599	1 035
1 125	0 125	1 000	0 442	1 502	30,920	12,600	12,600	660	0 971
1 125	0 134	0 982	0 470	1 597	32,880	13,390	13,390	692	0 937
1 125	0 156	0 938	0 536	1 823	37,530	15,220	15,220	764	0 855
1 500	0 095	1 310	0 419	1 426	29,350	7,480	7,480	808	1 667
1 500	0 102	1 296	0 446	1 523	31,350	8,480	8,480	856	1 632
1 500	0 109	1 282	0 476	1 619	33 4 0	9,430	9,430	902	1 597
1 500	0 125	1 250	0 540	1 836	3779 0	10,690	10,690	1,001	1 518
1 500	0 134	1 232	0 575	1 955	40,250	11,380	11,380	1,053	1 474
1 500	0 156	1 188	0 659	2 239	4 6 100	13,040	13,040	1,172	1 371
1 750	0 109	1 532	0 562	1 910	393 30	7,260	7,260	1,267	2 280
1 750	0 125	1 500	0 638	2 169	4 466 0	9,210	9,210	1,413	2 186
1 750	0 134	1 482	0 680	2 313	4 7 6 20	9,890	9,890	1,491	2 134
1 750	0 156	1 438	0 781	2 656	54,660	11,360	11,360	1,670	2 009
2 000	0 109	1 782	0 648	2 201	45,320	5,610	5,610	1,694	3 085
2 000	0 125	1 7 5	0 736	2 503	51,540	7,310	7,310	1,896	2 975
2,000	0 134	1 732	0 786	2 671	54,960	8,260	8,260	2,005	2 914
2,000	0 156	1 68 8	0 904	3 072	63,260	10,060	10,060	2,257	2 765
2 000	0 188	1 624	1 070	3 638	74,910	11,920	11,920	2,590	2 562
2 000	0 203	1 594	1 146	3 896	80,220	12,760	12,760	2,733	2 468

Tabla 1 Datos de la Tuberia Flexible*, continuación

Diam Ext (pg)	Espesor (pg)	Diam Int (pg)	Area (pg ²)	Peso (lb/pe)	Cap Carga "mín,psi"	Cedencia "mín,psi"	Colapso "mín,psi"	Torque lb - pie	Capacidad bl/1000 pies
70,000 psi de esfuerzo a la cedencia									
2 380	0 109	2 157	0 776	2.638	54,310	6,130	3,780	2,452	4 520
2 380	0.125	2.125	0 884	3 004	61,850	7,070	5,210	2,755	4 387
2.380	0 134	2 107	0 943	3.207	66,030	7,600	6,010	2,920	4,313
2 380	0 156	2 063	1 088	3 697	76,120	8,900	7,980	3,304	4 134
2 380	0 188	1 999	1 292	4 391	90,410	10,780	10,200	3,822	3 882
2 380	0.203	1 969	1.385	4 709	96,960	11,670	10,940	4,048	3 766
2 875	0 125	2 625	1 080	3 671	75,590	5,840	3,260	4,151	6 694
2.875	0.134	2 607	1 154	3 923	80,770	6,280	3,930	4,408	6 602
2 875	0 156	2 563	1 333	4 530	93,270	7,350	5,560	5,014	6 381
2 875	0 188	2 499	1 587	5.395	111,080	8,910	7,920	5,841	6 067
2 875	0.203	2 469	1 704	5 793	119,280	9,640	9,030	6,207	5,922
3 500	0.134	3 232	1 417	4 817	99,180	5,160	2,490	6,700	10 147
3 500	0 156	3 188	1 639	5 571	114,710	6,040	3,500	7,653	9 873
3.500	0 175	3 150	1.828	6 215	127,960	6,790	4,650	8,444	9 639
3 500	0.188	3 124	1 956	6 650	136,920	7,320	5,440	8,969	9 481
3 500	0.203	3 094	2 103	7 148	147,180	7,920	6,350	9,559	9 299
3 500	0 250	3 000	2 553	8 678	178,670	9,800	9,210	11,300	8 743
75,000 psi de esfuerzo a la cedencia									
0 750	0 083	0 584	0 174	0 591	13,040	16,400	17,500	.	0.331
1 000	0.083	0.834	0 239	0 813	17,930	12,400	13,200	.	0 676
1 250	0 095	1 084	0.304	1 034	22,820	9,900	10,600	.	1 141
1 500	0 095	1 310	0 419	1 426	31,460	9,500	10,100	...	1 667
1 750	0.095	1 560	0 494	1 679	37,050	8,100	8,700	.	2 364
80,000 psi de esfuerzo a la cedencia									
0 750	0 067	0 616	0.144	0 469	11,500	13,010	150	150	0 369
1 000	0.067	0 866	0 196	0 668	15,710	9,160	286	286	0 729
1 000	0 075	0 850	0 218	0 741	17,430	11,100	313	313	0 702
1 000	0 087	0 826	0 250	0.848	19,960	12,700	350	350	0 663
1 000	0 095	0 810	0 270	0 918	21,600	13,750	373	373	0 637
1.000	0 102	0.796	0.288	0 978	23,020	14,650	392	392	0 616
1 000	0 109	0 782	0.305	1 037	24,400	15,530	410	410	0 594
1 250	0 087	1.116	0 249	0.847	19,920	5,870	466	466	1.210
1 250	0 075	1 100	0 277	0 941	22,140	7,440	512	512	1 175
1 250	0.087	1 076	0 318	1.081	25,420	9,800	576	576	1 125
1.250	0 095	1 060	0 345	1 172	27,570	11,230	617	617	1 091
1 250	0.102	1 046	0 368	1 251	29,420	11,990	652	652	1.063
1 250	0 109	1 032	0 391	1 328	31,250	12,730	684	684	1 035

Tabla 1 Datos de la Tubería Flexible*, continuación									
Diam. Ext (pg)	Espesor (pg)	Diam Int	Area (pg ²)	Peso (lb/pie)	Cap Carga "mín,psi"	Cedencia "mín,psi"	Colapso "mín,psi"	Torque lb - pie	Capacidad bl/1000 pies
80,000 psi de esfuerzo a la cedencia									
1 250	0 125	1 000	0 442	1 502	35,340	14,400	755	755	0 971
1 250	0 134	0 982	0 470	1 597	37,580	15,310	791	791	0 937
1 250	0 156	0 938	0 536	1 823	42,890	17,470	873	8 73	0 855
1 500	0 095	1 310	0 419	1 426	33,540	9,600	8,260	924	1,667
1 500	0 102	1 296	0 448	1 523	35,830	10,340	9,410	978	1,632
1 500	0 109	1 282	0 476	1 619	38,100	11,090	10,560	1,030	1,597
1 500	0 125	1 250	0 540	1 836	43,190	12,800	12,220	1,144	1,518
1 500	0 134	1 232	0 575	1 955	46,000	13,760	13,010	1,204	1,474
1 500	0 156	1 188	0 669	2,239	52,690	16,100	14,900	1,340	1,371
1 750	0 109	1 332	0 562	1 910	44,950	9,500	8,010	1,448	2,280
1 750	0 125	1 500	0 638	2 169	51,050	10,970	10,250	1,614	2,186
1 750	0 134	1 482	0 680	2,313	54,420	11,790	11,310	1,704	2,134
1 750	0 156	1 438	0 781	2 656	62,490	13,800	12,990	1,908	2,009
2 000	0 109	1 782	0 648	2 201	51,800	8,320	6,090	1,936	3,085
2 000	0 125	1 750	0 736	2 503	58,900	9,600	8,060	2,167	2,975
2 000	0 134	1 732	0 786	2 671	62,840	10,320	9,160	2,291	2,914
2 000	0 156	1 688	0 940	3 072	72,290	12,080	11,500	2,579	2,768
2 000	0 188	1 624	1 070	3 638	85,610	14,640	13,620	2,960	2,562
2 000	0 203	1 594	1 146	3 896	91,680	15,840	14,590	3,123	2,468
2 375	0 109	2 157	0 776	2 638	62,070	7,000	3,980	2,802	4,520
2 375	0 125	2 125	0 884	3 004	70,680	8,080	5,630	3,149	4,387
2 375	0 134	2 107	0 943	3 207	75,470	8,690	6,570	3,337	4,313
2 375	0 156	2 063	1 088	3 697	87,000	10,170	8,840	3,776	4,134
2 375	0 188	1 999	1 292	4 391	110,330	12,320	11,660	4,368	3,882
2 375	0 203	1 969	1,385	4 709	110,810	13,330	12,500	4,626	3,766
2 875	0 125	2 625	1 080	3 671	86,390	6,670	3,470	4,744	6,894
2 875	0 134	2 607	1 154	3,923	92,310	7,170	4,150	5,038	6,602
2 875	0 156	2 563	1,333	4 530	106,600	8,400	6,030	5,730	6,381
2 875	0 188	2 499	1,587	5,395	126,950	10,180	8,770	6,875	6,067
2 875	0 203	2,469	1 704	5 793	136,320	11,010	10,050	7,094	5,922
3 500	0 134	3,232	1,417	4 817	113,350	5,890	2,640	7,657	10,147
3 500	0 156	3 188	1 639	5,571	131,100	6,900	3,650	8,746	9,873
3 500	0 175	3 150	1 828	6 215	146,240	7,770	4,990	9,650	9,639
3 500	0 188	3 124	1 956	6,650	155,490	8,360	5,900	10,251	9,481
3 500	0 203	3 094	2 103	7 148	168,210	9,050	6,950	10,925	9,299
3 500	0 250	3 000	2 553	8 678	204,200	11,200	10,250	12,915	8,743

Nota: Los valores mostrados son para una tubería nueva sin ovalidad y sin aplicar cargas de tensión
*Coiled Tubing Hand book, World Oil 1993.

Tabla 2 - Predicción de la presión de colapso y grado de ovalidad para una tubería CT70, CT80, CT90 aplicando carga de tensión *

Especificaciones							Esfuerzo Mínimo a la Cedencia, (kpsi)														
							70					80					90				
							Espesor					Ovalidad, $(D_{max} - D_{min})/D$					Carga de Tensión, L				
												0			0.02						
Diam Ext	Espesor	Diam Int	Peso	Relación	L=0	L=0	Ly/2	L=0	Ly/2	L=0	L=0	Ly/2	L=0	Ly/2	L=0	L=0	Ly/2	L=0	Ly/2		
D (pg)	t (pg)	d (pg)	W (lb/pie)	D/t (min)																	
							Presión de Colapso, (psi)														
1 000	0.075	0 085	0 741	0 070	14 290	8,910	5,196	3,556	3,714	2,542	9,903	5,869	4,017	4,207	2,879	10,850	6,527	4,467	4,692	3,211	
1 000	0 080	0 840	0 786	0 075	13 330	9,713	5,738	3,928	4,139	2,833	11,100	6,559	4,489	4,730	3,237	12,250	7,320	5,010	5,289	3,619	
1 000	0 087	0 826	0 848	0 082	12 200	1,054	6,443	4,409	4,712	3,225	12,040	7,361	5,038	5,381	3,685	13,550	8,283	5,669	6,058	4,146	
1 000	0 095	0 810	0 918	0 090	11 110	1,147	7,258	4,967	5,386	3,686	13,100	8,292	5,675	6,154	4,211	14,740	9,330	6,385	6,923	4,738	
1 000	0 102	0 796	0 978	0 097	10 310	1,226	7,977	5,459	5,988	4,098	14,010	9,116	6,239	6,843	4,684	15,770	10,260	7,022	7,700	5,270	
1 000	0 109	0 782	1 037	0 104	9 620	1,305	8,706	5,958	6,605	4,521	14,910	9,948	6,809	7,548	5,166	16,770	11,190	7,658	8,491	5,811	
1.000	0 125	0 750	1 168	0.117	8 550	1,446	1,006	6,885	7,774	5,320	16,530	11,500	7,871	8,885	6,081	18,600	12,940	8,856	9,997	6,842	
1.250	0 075	1.100	0 9412	0 070	17.86	5,933	3,555	2,433	2,504	1,714	6,464	3,972	2,178	2,815	1,926	6,940	4,367	2,967	3,114	2,131	
1 250	0 080	1 090	1.000	0 750	16 67	6,784	4,016	2,748	2,838	1,942	7,447	4,506	3,080	3,200	2,190	8,059	4,978	3,407	3,552	2,431	
1 250	0 087	1 076	1.081	0 082	15.24	7,984	4,671	3,197	3,321	2,273	8,822	5,264	3,603	3,756	2,570	9,624	5,841	3,998	4,182	2,862	
1 250	0 095	1.060	1 172	0 090	13 89	9,335	5,437	3,721	3,896	2,667	10,390	6 146	4,206	4,415	3,022	11,410	6,843	4,683	4,928	3,373	
1 250	0 102	1.048	1 251	0 097	12.89	10,020	5,999	4,106	4,350	2,977	11,460	6,856	4,692	4,971	3,402	12,880	7,712	5,278	5,592	3,827	
1 250	0 109	1 032	1.328	0 104	12 02	10,680	6,564	4,492	4,812	3,293	12,200	7,500	5,133	5,498	3,763	13,730	8,439	5,776	6,166	4,234	
1 250	0 125	1 000	1 502	0 117	10 68	11,880	7,628	5,220	5,694	3,897	13,570	8,715	5,965	6,507	4,453	15,270	9,806	6,711	7,320	5,010	
1 250	0 134	0 982	1 597	0 126	9 92	12,690	8,372	5,730	6,322	4,326	14,500	9,567	6,548	7,224	4,944	16,320	10,770	7,371	8,128	5,563	
1.250	0 156	0.938	1 823	0 148	8 45	14,610	10,210	6,988	7,902	5,408	16,700	11,670	7,987	9,031	6,181	18,790	13,130	8,966	10,160	6,954	
1 250	0 175	0 900	2 009	0 167	7 49	16,210	11,810	8,083	9,310	6,372	18,520	13,500	9,239	10,639	7,281	20,840	15,190	10,400	11,970	8,192	
1 500	0 095	1 310	1 426	0 090	16 67	6,784	4,016	2,748	2,838	1,942	7,447	4,506	3,084	3,200	2,190	8,059	4,978	3,407	3,352	2,431	
1 500	0 102	1 296	1 523	0 097	15 46	7,776	4,561	3,122	3,239	2,217	8,593	5,137	3,516	3,662	2,506	9,363	5,696	3,899	4,075	2,789	
1 500	0 109	1 250	1.619	0 104	14 42	8,768	5,116	3,501	3,654	2,501	9,740	5,777	3,954	4,138	2,832	10,670	6,424	4,397	4,614	3,158	
1 500	0 125	1 232	1 836	0 117	12 82	10,070	6,040	4,134	4,383	2,999	11,510	6,903	4,724	5,009	3,428	12,940	7,764	5,313	5,634.1	3,158	
1 500	0 134	1 188	1 955	0 126	11 90	10,770	6,644	4,547	4,878	3,338	12,310	7,595	5,191	5,575	3,815	13,850	8,543	5,847	6,272	4,292	
1.500	0 156	1 150	2 239	0 148	10 14	12,450	8,150	5,578	6,143	4,198	14,230	9,315	6,375	7,011	4,798	16,010	10,480	7,173	7,887	5,398	
1 500	0 175	1 532	2 476	0 167	8 98	13,850	9,470	6,481	7,260	4,969	15,830	10,820	7,405	8,298	5,679	17,810	12,180	8,336	9,335	6,389	
0 175	0 109	1 532	1 910	0 104	16 83	6,662	3,949	2,703	2,789	1,909	7,306	4,330	3,032	3,144	2,152	7,899	4,891	3,347	3,488	2,387	
0 175	0 125	1 500	2 169	0 117	14 96	8,241	4,820	3,299	3,432	2,349	9,131	5,436	3,720	3,883	2,658	9,975	6,037	4,131	4,326	2,961	
0 175	0 134	1 482	2 313	0 126	13 89	9,335	5,437	3,721	3,896	2,667	10,390	6,143	4,206	4,415	3,022	11,410	6,843	4,683	4,928	3,373	
0 175	0 156	1 482	2 656	0 148	11 82	10,840	6,703	4,588	4,925	3,371	12,390	7,661	5,243	5,630	3,853	13,940	8,619	5,899	6,334	4,335	
0 175	0 175	1 400	2 944	0 167	10 48	12,090	7,817	5,350	5,350	4,000	13,810	8,931	6,113	6,688	4,577	15,540	10,050	6,878	7,524	5,140	
0 175	0 188	1 374	3 136	0 180	9 72	12,920	8,586	5,876	5,846	4,451	14,760	9,811	6,714	7,431	5,086	16,610	11,040	7,556	8,361	5,722	

Tabla2 - Predicción de la presión de colapso y grado de ovalidad para una tubería CT70, CT80, CT90 aplicando carga de tensión* (Continuación)

Especificaciones						Esfuerzo Mínimo a la Cedencia, (kpsi)														
						70					80					90				
						Ovalidad, $(D_{máx} - D_{mín})/D$					Carga de Tensión, L					Presión de Colapso, (psi)				
						0		0 02		0 05	0		0 02		0 05	0		0 02		0 05
Diam Ext	Espesor	Diam int	Peso	Espesor	Relación	L=0	L=0	Ly/2	L=0	Ly/2	L=0	L=0	Ly/2	L=0	Ly/2	L=0	Ly/2			
D	t	d	W	Mínimo	D/t (mín)	L=0	L=0	Ly/2	L=0	Ly/2	L=0	L=0	Ly/2	L=0	Ly/2	L=0	Ly/2			
(pg)	(pg)	(pg)	(lb/pie)	t (mín)																
2 000	0 109	1 782	2 201	0 104	19 23	5,083	3,099	2,121	2,179	1,491	5,481	3,441	2,355	2,439	1,669	5,822	3,758	2,572	2,685	1,838
2 000	0 125	1 750	2 503	0 117	17 09	6,465	3,842	2,630	2,711	1,856	7,078	4,305	2,947	3,051	2,090	7,639	4,749	3,250	3,386	2,318
2 000	0 134	1 732	2 671	0 126	15 87	7,421	4,365	2,988	3,094	2,118	8,184	4,911	3,361	34,495	2,392	8,897	5,439	3,722	3,887	2,660
2 000	0 156	1 688	3 072	0 148	13 51	8,593	5,640	3,860	4,058	2,778	10,890	6,427	4,399	4,628	3,168	11,970	7,160	4,900	5,168	3,537
2 000	0 175	1 624	3 638	0 180	11,11	11,470	7,258	4,967	5,386	3,686	13,100	8,292	5,675	6,154	4,211	14,740	9,330	6,385	6,923	4,738
2 000	0 189	1 594	3 896	0 195	10,26	12,320	8,030	5,496	6,032	4,129	14,080	9,117	6,281	6,894	4,718	15,840	10,320	7,063	7,756	5,308
2 000	0 203	1 594	3 896	0 195	10,26	12,320	8,030	5,496	6,032	4,129	14,080	9,117	6,281	6,894	4,718	15,840	10,320	7,063	7,756	5,308
2 375	0 109	2 157	2 638	0 104	22 84	3,337	2,169	1,484	1,536	1,051	3,526	2,370	1,622	1,701	1,164	3,754	2,582	1,767	1,869	1,279
2 375	0 125	2 125	3 004	0 117	20 30	4,501	2,789	1,009	1,961	1,342	4,809	3,079	2,107	2,186	1,496	5,057	3,339	2,286	2,396	1,640
2 375	0 134	2 107	3 207	0 126	18 85	5,307	3,218	2,203	2,263	1,549	5,740	3,581	2,451	2,537	1,736	6,116	3,918	2,682	2,797	1,914
2 375	0 156	2 063	3 697	0 148	16 05	7,276	4,285	2,933	3,036	2,077	8,016	4,818	3,298	3,427	2,346	8,706	5,334	3,650	3,810	2,607
2 375	0 175	2 025	4 112	0 180	14 22	8,977	5,234	3,582	3,743	2,561	9,981	5,913	4,047	4,240	2,902	10,940	6,577	4,502	4,729	3,237
2 375	0 189	1 999	4 391	0 195	13 19	9,806	5,818	3,982	4,203	2,876	11,210	6,650	4,551	4,803	3,287	12,470	7,446	5,096	5,384	3,685
2 375	0 203	1 967	4 709	0 195	12 18	10,550	6,453	4,416	4,720	3,230	12,060	7,375	5,048	5,395	3,692	13,570	8,298	5,679	6,070	4,154
2 875	0 125	2 625	3 671	0 117	24 57	2,833	1,872	1,281	1,329	909	3,031	2,058	1,409	1,477	1,011	3,193	2,225	1,523	1,615	1,105
2 875	0 134	2 607	3 923	0 126	22 82	3,345	2,173	1,487	1,539	1,053	3,531	2,374	1,625	1,703	1,166	3,761	2,586	1,770	1,872	1,281
2 875	0 156	2 563	4 530	0 148	19 43	4,972	3,040	2,080	2,137	1,463	5,353	3,372	2,308	2,391	1,636	5,676	3,678	2,518	2,630	1,800
2 875	0 175	2 525	5 046	0 167	17 22	6,377	3,794	2,597	2,677	1,832	6,977	4,250	2,909	3,014	2,083	7,524	4,686	3,207	3,341	2,287
2 875	0 189	2 499	5 395	0 180	15 97	7,338	4,319	2,956	3,061	2,095	8,088	4,858	3,325	3,456	2,365	8,788	5,379	3,681	3,843	2,630
2 875	0 203	2 469	5 793	0 195	14 74	8,447	4,936	3,378	3,519	2,408	9,369	5,569	3,811	3,982	2,726	10,250	6,189	4,236	4,439	3,038
3 500	0 134	3 232	4 817	0 126	27 78	2,181	1,470	1,006	1,045	715	2,281	1,591	1,089	1,149	787	2,340	1,687	1,154	1,239	848
3 500	0 156	3 188	5 571	0 148	23 65	3,054	2,010	1,376	1,427	977	3,285	2,218	1,518	1,591	1,089	3,481	2,408	1,648	1,745	1,194
3 500	0 175	3 150	6 215	0 167	20 96	4,172	2,614	1,789	1,840	1,259	4,429	2,873	1,966	2,045	1,400	4,624	3,101	2,122	2,233	1,528
3 500	0 189	3 124	6 650	0 180	19 44	4,961	3,034	2,077	2,133	1,460	5,341	3,366	2,304	2,386	1,633	5,662	3,671	2,512	2,625	1,796
3 500	0 203	3 094	7 148	0 190	17 95	5,872	3,622	2,410	2,480	1,697	6,394	3,934	2,682	2,787	1,908	6,861	4,324	2,859	3,083	2,110

Nota kpsi=mil libras por pulgada cuadrada, D=dímetro, mín= mínimo, lb=libras, psi=libras por pulgada cuadrada Presión de Colapso para una TF redonda, Ovalidad, $(D_{máx} - D_{mín})/D$

* " Recommended Practice for Coiled Tubing Operations in Oil and Gas Services"

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- 1 Quigley Scott; **“CT Technology for Engineers and Supervisors”**. Coiled Tubing Engineering Services, L. C. Conroe, Texas 1999.
- 2 Sas – Jaworsky Alexander; **“ Coiled Tubing ... operations and Services”**. Part 1,2.Coiled Tubing Hand book. World Oil, 1993.
- 3 Gronseth J. Mark; **“ Coiled Tubing ... operations and Services”**. Part 11, Drilling. Coiled Tubing Hand book. World Oil, 1993.
- 4 American Petroleum Institute; **“ Recommended Practice For Coiled Tubing Operations in Oil and Gas Well Services”**.Firth Edition, December 1996.
- 5 Avakov V. A, Foster J. C. and Smith, E. J; **“Coiled Tubing Life Prediction”**. OTC 7325, Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1993.Conrad A.
- 6 Wu Jiang; **“Coiled Tubing Working Life Prediction”**. Paper SPE 29461 presented at the Production Operations Symposium held Oklahoma City, Ok, U. S. A. 2 – 4 April 1995.
- 7 Bruce, Morrison Dan W. and Mullins Rufus; **“Effective Management of Coiled Tubing Workstring”**. Paper SPE 46034 presented at the 1998 SPE/IcoTA Coiled Tubing Rountable held in Houston, Texas, 15- 16 April 1998.
- 8 Newman K. R. and Brown P. A.; **“ Development of a Standard Coiled Tubing Fatigue Test”**. SPE 26539, October 1993.
- 9 Tipton, S. M. , **“Coiled Tubing Deformation Mechanics: Diametral Growth and Elongation”**. SPE 36336, Feb. 26 – 28, 1996.
- 10 Newman, K.R.; **“Coiled Tubing Pressure and Tension Limits”**. Paper SPE 23131 presented at the Offshore Europe Conference in Amsterdam, September 3 – 6 , 1991.
- 11 Newman K.R.; **“Collapse Pressure of Oval Coiled Tubing”**. SPE 24988, November 1992.
- 12 Avakov Vladimir; **“ Collapse Data Analysis and Coiled Tubing Limits”**. SPE 46004, April 1998.
- 13 Wu Jiang and Juvkan – Wold ; **“ Study of Helical Buckling of Pipes in Horizontal Wells”**. SPE 25503. March 21 – 23, 1993.

- 14 Dawson Rapiet, “ **Drill Pipe Buckling in Inclined Holes**”. Journal of Petroleum Technology. October 1994.
- 15 Wu Jiang, Hans C. Juvkam – Wold. “**Coiled Tubing Bucking Implication in Drilling and Completing Horizontal Wells**”.SPE Drilling & Completion, March 1995.
- 16 R. F. Mitchell, Enertech Engineering and Research Co.; “ **Effects of Well Desviation on Helical Buckling**”. Paper SPE 29462 presented at the Production Operations Symposium held in Oklahoma City, Ok, U. S. A., 2 – 4 April 1995.
- 17 Qiu Weiyong, Miska Stefan and Volk Leonard.; “**Effect of Coiled Tubing Initial Configuration on Buckling Behavior in Hole of Constant Curvature**”. SPE 46009, April 1998.
- 18 “ **Coiled Tubing Drilling**” Tool Kit. Dowell Shlumberger.
- 19 Leising Larry J. and Newman Kenneth R.; “ **Coiled Tubing Drilling**”. SPE 24594 Drilling & Completion, December 1993.
- 20 Walton Ian C., and Gu Hongren; “**Hidraulics Desing in Coiled Tubing Drilling**”. Paper presented at the IcoTA/ SPE Rountable held in Montgomery,Texas, 26 – 28 February 1996.
- 21 Young S. Yang ; “**Equation Determinates Pressure Drop in Coiled Tubing**”. Precision Tube Technology, Inc. Houston, Texas.
- 22 Gu Hougren, Newman Kenneth R. and Hauglund L. F; “**Analysis of Slack-Off Force Transmitted Downhole in Coiled- Tubing Operations**”. SPE 26511 October 1993.
- 23 Goodrich, G.T, Smith B. E. and Larson E. B.; “**Coiled Tubing Practices at Prudhoe Bay**”. AIDC / SPE 35128. March 1996
- 24 Coper R E; “**Coiled Tubing in Horizontal Wells**”. Paper SPE 17581 presented at the SPE International Meeting on Petroleum Engineering held Tainjin, China, November 1 – 4, 1988.
- 25 Zheng Andrew S and Larsen Henrik A.; “**High – Pressure Coiled – Tubing – String Desing**”. SPE 54480, May 1999.
- 26 Eide Egil, Brinkhorst and Völker Heiz; “ **Further Advances in Coiled - Tubing Drilling**”. SPE 28866. 25 – 27 October 1994.

BIBLIOGRAFÍA

- ¹ Alvarez Ortiz Juan Eliseo ; “ **Tecnología para el empleo de la Tubería Flexible**”. Instituto Mexicano del Petróleo. México, D. F. Julio del 2000.
- ² **Enterra de México, S. A. de C. V.** Poza Rica, Ver.
- ³ González González José Luis, Carlos Osornio Vázquez, Humberto Castro Martínez, Miguel A. Mendoza Herrera, J. Antonio Martínez Ramírez. “**Reentradas con tubería flexible para la recuperación de pozos cerrados de la Región Marina**”. Cd. del Carmen, Campeche, Marzo de 1999.