UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
EN EXPLOTACIÓN Y EXPLORACIÓN DE RECURSOS NATURALES
CAMPO DISCIPLINARIO PERFORACIÓN

"ANÁLISIS DE FATIGA EN LA TUBERÍA FLEXIBLE"

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
EVELIO ENRIQUE ALVAREZ HERNANDEZ

TUTOR

M. EN C. JAIME ORTIZ RAMÍREZ, PEMEX

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D. F. (NOVIEMBRE) 2015

(Conformación de tesis)

HOJA DE APROBACIÓN.

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

Dedico y Agradezco la realización de esta tesis a Dios nuestro señor por permitirme vivir y permitirme estudiar una maestría en esta gran institución.

Dedico esta tesis con mi alma y espíritu a mi esposa Rosario, mis dos hermosos hijos Enrique y Sebastián, mis padres y hermanas.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme realizar este logro.

Agradezco a todos y cada uno de mis maestros de los cursos propedéuticos y maestría por su gran labor para con nosotros los alumnos.

Agradezco al M. en C. Jaime Ortiz Ramírez por su valiosa asesoría para la realización de este trabajo.

Agradezco al M. en C. David Escobedo Zenil por su valiosa aportación y orientación para la realización de este trabajo

Agradezco al Doctor Fernando Samaniego Verduzco por su valiosa asesoría para la realización de este trabajo

Agradezco al M. en C. Noé Santillán Piña por su valiosa asesoría para la realización de este trabajo

Agradezco al M. en I. Josué Méndez Gerónimo por su valiosa asesoría para la realización de este trabajo

Agradezco a mi esposa por todo su apoyo y comprensión durante todo este tiempo.

Agradezco a mi madre por apoyo incondicional.

Agradezco a mi padre por su apoyo tan grande durante estos años.

Agradezco a mis hermanas por todo su apoyo económico y moral.

Agradezco a mi s suegros por tan valioso apoyo.

Agradezco a todos mis amigos y compañeros de maestría por todos los buenos momentos fáciles y difíciles.

¡GOYA! ¡GOYA! ¡CACHUN, CACHUN, RA, RA! ¡GOYA! ¡UNIVERSIDAD!

ABSTRACT

This thesis is focused on the analysis of stresses in the Coiled Tubing, these occurrences that lead to fatigue; in this thesis bending events alternating accompanied by efforts in reel and gooseneck, the stresses in the pipe within an oil well, variations in the diameter and wall thickness will be analyzed; the elastic modulus of the pipe, Poisson's ratio, modulus of rigidity, modulus E and the elastic limit are explained.

Parts of coiled tubing equipment are also explained some tools used as background assemblies and their different applications, some operations are performed in the oil industry both preventive and corrective maintenance, as drilling technique DCT, wherein coiled tubing drilling uses a continuous column of coiled tubing to drill, unlike the drill pipe, which must be threaded to form the drill string; the hose comes in a reel that unwinds as drilling progresses, and wound on his spool during travel, as well as their advantages and disadvantages of carrying the drilling technology. Issues such as cumulative damage, and different types of fatigue, equations that help the understanding of the issues, examples for better understanding and study in appendices at the end of the thesis is proposed, and the simulation will be discussed by a trading program for different types of pipe, among other things.

They will identify and model the factors contributing to fatigue of the hose in different stages of the operations performed and thereby recommend and schedule your timely change and reliable results to contribute to this work in the oil industry. This work will help to better understand the operation of coiled tubing equipment and predicting fatigue failure; this work will meet many important and vital in operations where the flexible pipe technology is used aspects.

The coiled tubing fatigue due to constant bending cycles on its way into and out of the well, the internal and external pressure and axial forces and circumferential to which it is subjected along the path of an oil well; These events lead to the pipe to present elastic and plastic deformations.

Fatigue failure is associated with applying repeatedly varying loads, on different sides of the tube, which can lead to an event of collapse or bursting and the generation of micro cracks which propagate to eventual fatigue failure . This is a progressive and cumulative local phenomenon, with stages of initiation, propagation and sudden failure of the material.

Fatigue damage can become catastrophic, causing serious economic damage.

RESUMEN

Esta tesis está enfocada al análisis de esfuerzos presentes en la Tubería Flexible (TF), mismos que la llevan a ocurrencias de fatiga; en esta tesis se analizarán los eventos de doblamiento acompañados de los esfuerzos alternados en carrete y cuello de ganso, los esfuerzos presentes en la tubería dentro de un pozo petrolero, variaciones en el diámetro y espesor de pared; se explicarán los módulos elásticos de la tubería, coeficiente de Poisson, módulo de rigidez, modulo E, así como los limites elásticos. También se explicarán las partes de un equipo de TF, algunas herramientas que se usan como ensambles de fondo y sus diferentes aplicaciones, algunas operaciones que se llevan a cabo en la industria petrolera tanto de mantenimiento preventivo y correctivo, como de perforación con la técnica de PTF, en donde la perforación con tubería flexible utiliza una columna continua de tubería flexible para perforar, a diferencia de la tubería de perforación, la cual debe ser roscada para formar la sarta de perforación; la tubería flexible viene en un carrete que se desenrolla a medida que la perforación progresa, y se enrolla en su carrete durante los viajes, así como sus ventajas y desventajas de llevarla a la perforación con esta tecnología. Se discutirán temas como el daño acumulado, y diferentes tipos de fatiga, ecuaciones que ayudaran a la comprensión de los temas, se propondrán ejemplos para su mejor comprensión y estudio en apéndices al final de la tesis, y la simulación por medio de un programa comercia para diferentes tipos de tubería, entre muchas otras cosas más.

Se identificarán y modelarán los factores que contribuyen a la fatiga de la tubería flexible en los diferentes escenarios de las operaciones que se realizan y con ello recomendar y programar su cambio oportuno, así como obtener resultados confiables para contribuir con este trabajo en la industria petrolera. Este trabajo ayudará a conocer mejor el funcionamiento de los equipos de tubería flexible y su predicción de fallas por fatiga; en este trabajo se reunirán muchos aspectos importantes y vitales en las operaciones donde se utilice la tecnología de la Tubería flexible.

La tubería flexible se fatiga debido a los ciclos constantes de flexión en su recorrido hacia dentro y fuera del pozo, a las presiones interna y externa y a los esfuerzos axiales y circunferenciales a los que se somete a lo largo de la trayectoria de un pozo petrolero; estos eventos llevan a la tubería a presentar deformaciones elásticas, y plásticas.

La falla por fatiga está asociada a la aplicación de cargas variables repetidas, en las diferentes caras del tubo, lo que puede conducir a un evento de colapso o estallamiento así como la generación de micro grietas, las cuales se propagan hasta la eventual falla por fatiga. Este es un fenómeno local progresivo y acumulativo, con etapas de iniciación, propagación y falla repentina del material.

Los daños por fatiga pueden llegar a ser catastróficos, causando afectaciones económicas graves.

LISTA DE FIGURAS

Paginas

Figura 1.- Partes de un equipo de tubería flexible (manual de TF de la compañía Petrotec 2012)……..…….X

Figura 2.1.- Eventos de doblamiento, dados en el carrete y el cuello de ganso (modificado de manual de TF de la compañía Petrotec 2012)……..10

Figura 2.2.- Punto de cedencia del material.…….…….……11

Figura 2.3.- Diagrama esfuerzo deformación para una aleación acero carbón similar a la aleación de la tubería flexible (modificada de manual de TF Petrotec, 2012)……..13

Figura 2.4.-Tenacidad de un Metal Frágil (izquierda) y de un Metal Dúctil (derecha**).** Tipo de acero empleado en TF (manual Petrotec 2012)……16

Figura 2.5.- Principales esfuerzos y eventos de doblamiento de la TF (Modificado de manual Petrotec 2012)……...19

Figura 2.6.- Remoción de asentamientos de partículas con TF en pozos horizontales (Diplomado de actualización en ingeniería petrolera Pemex 2011)…….…34

Figura 2.7.- Equipo de perforación de pozos con tubería flexible. (es.jereh-pe.com 2015)…….34

Figura 2.8.- Esquema de perforación desviada con TF. (Diplomado de actualización en ingeniería petrolera Pemex 2011)…….…35

Figura 3.1.- Severidad asociada de la trayectoria. (modificado de paper SPE, 2006)……..40

Figura 3.2.- Curvas de esfuerzo vs número de ciclos S-N o curva de Wohler (manual de TF Petrotec 2012)……...48

Figura 3.3.- Tipos de carga: (a) Repetida, (b) Totalmente reversa, (c) Fluctuante. (manual de TF Petrotec 2012)…….50

Figura 3.4.- Cargas en combinación (manual de TF Petrotec 2012)……50

Figura 4.1.- (software NOV CTES versión 2012)La elongación esperada a la profundidad programada de **867 m**. es de **0.34 m**. al descenso y **0.34 m** al ascenso de la tubería dentro del pozo…….55

Figura 4.2.-Representacion grafica de los límites de la tubería flexible (software NOV CTES versión 2012)……..56

Figura 4.3.-Deformación de TF respecto a la profundidad……...……57

Figura4.4.-Cara fracturad de la punta del tramo de la tubería simulado……..…….71

Figura4.5.-Cara de la punta de la tubería dañada y rota en la parte rojiza……75

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1.-Factores compensación y reducción de área (Manual de TF de la compañía Petrotec 2012)……..……..26

Tabla 4.1.- Limites elasticos de la TF de acuerdo a los esfuerzos presentes……58

Tabla 4.2.- Deformación total y deformación unitaria en la TF que se estudio……....59

Tabla 4.3.- Cambios en el diámetro, espesor de pared y ovalidad……60

Tabla 4.4 aplicando el criterio de Von mises al 80% ……...……61

Tabla.- 4.5 Cambios en el diámetro y espesor de pared respecto a la profindidad……...62

CONTENIDO (ÍNDICE)

Paginas

HOJA DE APROBACIÓN……..……I

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS……..…..……II

ABSTRACT……..……...……....III

RESUMEN…….…..…...….IV

LISTA DE FIGURAS……..……..V

LISTA DE TABLAS……..…....VII

CONTENIDO
(ÍNDICE)…….…….....VIII

INTRODUCCIÓN……...……..…XI

CAPÍTULO 1.- GENERALIDADES

1.1.- Objetivo general……..1

1.2.- Objetivo específico……...……..1

1.3.- Justificación de Tesis……..……1

1.4.- Planteamiento del problema……2

1.5.- Metas……...……3

1.6.- Definición de fatiga……3

1.7.- Definición y origen de la tubería flexible…….…….5

1.8.- Mención de algunas operaciones realizadas con tubería flexible…….……7

1.9.- Resultados esperados…….…….8

1.10.- Métodos empíricos para minimizar la fatiga……9

CAPÍTULO 2.- MARCO TEÓRICO**.**

2.1.- Propiedades elásticas y plásticas de la TF……10

2.2.- Análisis de esfuerzos en la TF y eventos que conllevan a la fatiga del material……18

2.3.- Von Mises……..……..23

2.4.- Máximo esfuerzo de doblamiento de la tf en el carrete y cuello de ganso según Avakov……..23

2.5.- Introducción a la perforación con TF……..……..26

2.6.- Ventajas y desventajas de perforación con TF……..……28

2.7.- Aspectos relevantes para la perforación con TF……...……29

CAPÍTULO 3.- DESARROLLO DE LA PROBLEMÁTICA.

3.1.-Desarrollo de fisuras en la tubería……..……36

3.2.- Análisis de fatiga por giro de la tubería……39

3.3.-Fatiga por corrosión en la TF……..……45

3.4.-.Daño acumulado……...47

3.5.- Operaciones de molienda y limpieza de pozos con TF……..……..51.

CAPÍTULO 4.- VALIDACIÓN.

4.1.- Comparación de resultados para calcular los limites elásticos y plásticos de la tubería flexible……...54

4.2.-Simulación para un tramo de tubería flexible usando el software "SOLID WORKS" versión 2014……..63

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....64

APÉNDICE A……..67

APÉNDICE B……..72

APÉNDICE C……...76

APÉNDICE D……...80

GLOSARIO…….…..81

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS…….82

INTRODUCCIÓN

En la industria del petróleo la tubería flexible (TF) se ha vuelto una herramienta esencial, tanto para la perforación, como en el mantenimiento preventivo y correctivo; en este trabajo analiza la problemática de la fatiga y vida útil de la TF.

La falla por fatiga es resultado de la aplicación de cargas variables repetidas (de una amplitud típicamente por debajo de la tensión de fluencia del material. Este es un fenómeno local progresivo y acumulativo, con etapas de iniciación, propagación y falla repentina del material. Los componentes de las cargas cíclicas son esfuerzos alternantes y esfuerzo estático medio.

La fuente principal de esfuerzo alternante en operaciones dentro de un pozo son las curvas del mismo que flexionan la tubería. Otras condiciones que pueden imponer cargas de flexión son tortuosidad del pozo, pandeo de la tubería, y la helicoidal, formada por el descenso de la tubería dentro del pozo.

Los esfuerzos a los que se somete la tubería la deforman y reducen o alargan de tal forma que es necesario su remplazo evitando así pérdidas o derrames en superficie.

Figura 1.- Partes de un equipo de tubería flexible (modificado de manual de TF de la compañía Petrotec 2012).

CAPITULO 1

GENERALIDADES.

1.1.- OBJETIVO GENERAL

Identificar los esfuerzos que contribuyen a la fatiga de la tubería flexible (TF) en los diferentes escenarios de las operaciones que se realizan en los pozos petroleros y con ello programar su cambio oportuno de la misma.

Se analizarán además de las operaciones diversas en pozos sin equipo, la problemática que representa la fatiga para las operaciones que se realizan, las propiedades plásticas, así como la deformación y elongación, rigidez, módulo de Young, relación de Poisson, y demás esfuerzos presentes en la tubería flexible; se analizará la problemática de la perforación con TF (PTF), ventajas y desventajas de llevarla a cabo con la misma.

Se identificaran los detonadores posibles de la fatiga, antes de que se presente consecuentemente un problema para evitar operaciones fallidas y cuantiosas pérdidas económicas.

1.2.- OBJETIVO ESPECIFICO

Se analizarán los esfuerzos axiales, tangenciales, y radial, así como los límites de la tubería aplicando el método de Von mises para determinación de los mismos y demostrar como ocurre la falla del material.

1.3.- JUSTIFICACIÓN DE TESIS.

Porque la tubería flexible se ha convertido en una herramienta esencial para las intervenciones a pozos en el mundo entero; este trabajo discutirá los esfuerzos a los que se somete la TF, los cuales disminuyen la resistencia a la fatiga de la tubería flexible, las causas de la fatiga así como su análisis, operaciones diversas con tubería flexible, y mención de algunas técnicas para la perforación con TF en pozos horizontales.

1.4.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Al entrar y salir del pozo, la TF experimenta en repetidas ocasiones el efecto de doblarse y desdoblarse dentro y fuera del carrete, así como en el cuello de ganso. Estos eventos entre otros más, se analizarán debido a que son detonantes de fatiga de la tubería flexible.

La alternancia de las tensiones de flexión provoca la deformación plástica y fallo por fatiga de la tubería flexible. La presión de trabajo interno en espiral por la fricción de los fluidos que pasan constantemente a través de ella, también produce una tensión circunferencial. A medida que la tubería flexible acumula carreras de trabajo, su diámetro decrece gradualmente debido a la elongación ocasionada por el efecto del peso lo que puede ocasionar grietas pequeñas en la superficie, resultando finalmente en el fallo del material de tubería flexible.

La resistencia a la fatiga por rotación en la TF se ve afectada al entrar en contacto con la severidad de la pata de perro (DLS por sus siglas en inglés); además debe considerarse el contacto con la rugosidad de la pared del pozo.

En la tubería flexible sus rutinas de predicción de vida convencional pueden predecir el daño por fatiga impuesta por ciclos de doblado y desdoblado en el carrete, mencionados técnicamente como el esfuerzo de rotación-flexión durante la perforación de pozos direccionales.

Dependiendo de la operación que se está llevando a cabo, es importante identificar los diferentes esfuerzos detonadores de la fatiga a los cuales se somete la TF, para poder determinar el número de viajes que podría faltar antes del fallo del material, tomando en cuenta la vida útil de la TF (dato obtenido por el prestador de servicios) y de ahí partir con el análisis.

En las diferentes operaciones que se realizan a diario en pozos petroleros, existe el riesgo de fatigar la TF a un punto donde se desarrollen fisuras, que se propagan sin ser visibles al ojo humano, ocasionando una rotura eventual del material, teniendo como consecuencia

derrames en superficie, y en el peor de los casos, un desprendimiento de la tubería generando un deslizamiento hacia el fondo del pozo.

1.5.- METAS

Obtener resultados confiables para contribuir con este trabajo en la industria petrolera, ya que este trabajo ayudará a conocer mejor el funcionamiento de los equipos de tubería flexible y su predicción de fallas por fatiga. En este trabajo se reunirán muchos aspectos importantes y vitales en las operaciones donde se utilice la tecnología de la tubería flexible.

Elaborar un proyecto de tesis que aporte conocimientos 100% confiables y relevantes, útiles a la industria petrolera actual de México.

1.6.- DEFINICIÓN DE FATIGA.

La fatiga consiste en el desgaste y ruptura posterior de un material. La fatiga de los materiales se presenta cuando se ejercen fuerzas repetidas aplicadas sobre el material, creando pequeñas grietas que pueden llegar a producir su ruptura.

Este es un fenómeno muy importante, ya que es la primera causa de ruptura en los metales. Los primeros casos de fatiga de los materiales se detectaron en las ruedas de las locomotoras, causando su rotura; acontecimientos como este fueron detonantes para el interés de algunas personas en estudiar este fenómeno al arribar la Revolución Industrial.

El proceso por el cual se va generando la fatiga en un material, se puede describir de la siguiente manera. Primero en el material, se comienza a formar una grieta que es imperceptible para el ojo humano, después aquella pequeña grieta se va ampliando al resto del material. En este punto la falla por fatiga es inminente.

La fatiga de un material consiste en el desgaste y ruptura posterior de un objeto construido por el ser humano. La fatiga del material tiene que ver más que nada con objetos, los cuales, soportan la carga. Lo anterior, se refiere a todos los objetos construidos por el hombre, diseñados para soportar peso..

Existen leyes infalibles en cuanto a la fatiga de un material. Si se aplica una carga estática, o sea, sin movimiento o contorsión, el material tenderá a resistir por más tiempo. Ahora, si la carga fuera dinámica, o sea, en movimiento o contorsión, la fatiga de material, se hará presente de manera más rápida.

Los esfuerzos variables en un elemento tienden a producir grietas, que crecen a medida que éstos se repiten, hasta que se produce la falla total; este fenómeno se denomina fatiga.

Por lo tanto, el diseño de elementos sometidos a cargas variables debe realizarse mediante una teoría que tenga en cuenta los factores que influyen en la aparición y desarrollo de las grietas, las cuales pueden producir la falla después de cierto número de repeticiones (ciclos) de esfuerzo. La teoría que estudia el comportamiento de los materiales sometidos a cargas variables, se conoce como teoría de fatiga.

El término "Fatiga" lo usa por primera vez por Poncelet en 1839, para describir la situación de la falla de los materiales sometidos a cargas variables. Debido a que la falla por fatiga tiene apariencia frágil, se pensaba que el material se había "cansado" y hecho frágil después de soportar un cierto número de fluctuaciones de esfuerzo. Similarmente, en 1843, Rankine publicó un estudio sobre las causas de la ruptura inesperada de los muñones de los ejes de ferrocarril, en el cual decía que el material dúctil se había cristalizado y hecho frágil debido a la fluctuación de los esfuerzos.

Luego, en 1870, después de 12 años de investigación sobre las fallas por fatiga, el ingeniero alemán August Wohler publicó los resultados de su estudio, en el cual se mostraba como culpable de la falla al número de ciclos de esfuerzo. Al realizar pruebas sobre las mitades rotas de los ejes que habían fallado por fatiga, observó que el material tenía la misma resistencia y ductilidad bajo carga de tensión que el material original; es decir, el material no se había "cansado" ni fragilizado como se creía. Sin embargo, el término fatiga se sigue utilizando para referirse a las fallas de elementos sometidos a cargas variables.

Wohler encontró además la existencia de un límite de resistencia a la fatiga (o límite de fatiga) para los aceros. Wohler realizó pruebas sobre probetas de acero sometidas a "flexión giratoria", denominada así al tipo de carga que se genera en un elemento que gira sometido a un momento flector constante.

En dichas pruebas se pretendía relacionar los niveles de esfuerzo a los cuales se sometían las probetas, con el número de ciclos de carga que soportaban hasta la falla. Wohler obtuvo un diagrama, el cual es conocido como diagrama S-NC (esfuerzo - número de ciclos) o diagrama de vida-resistencia de Wohler. El esfuerzo (o resistencia) S corresponde al valor del esfuerzo máximo al cual se somete la probeta, y nc es el número de ciclos de esfuerzo. Las líneas del diagrama representan aproximaciones a los puntos reales de falla obtenidos en los ensayos.

1.7.- DEFINICIÓN Y ORIGEN DE LA TUBERÍA FLEXIBLE

Al empezar este punto hablaremos de la soldadura en la tubería flexible

La soldadura es un proceso de fabricación en donde se realiza la unión de dos piezas de un material, (generalmente metales o termoplásticos), usualmente logrado a través de la coalescencia (fusión), en la cual las piezas son soldadas fundiéndose, se puede agregar un material de aporte (metal o plástico), que al fundirse forma un arco de material fundido entre las piezas a soldar y al enfriarse, se convierte en una unión fija a la que se le denomina cordón.

A veces se utiliza conjuntamente presión y calor, para producir la soldadura. Esto está en contraste con la soldadura blanda y la soldadura fuerte que implican el derretimiento de un material de bajo punto de fusión entre piezas de trabajo para formar un enlace entre ellos, sin fundir las piezas de trabajo.

Muchas fuentes de energía diferentes pueden ser usadas para la soldadura, incluyendo una llama de gas, un arco eléctrico, un láser, un rayo de electrones, procesos de fricción o ultrasonido. La energía necesaria para formar la unión entre dos piezas de metal generalmente proviene de un arco eléctrico. La energía para soldaduras de fusión o termoplásticos generalmente proviene del contacto directo con una herramienta o un gas caliente.

Cuando la tubería es soldada tubo a tubo causa una concentración de esfuerzos en las uniones de la tubería. Esta origina dos problemas: cuando la tubería flexible está 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.

Por otra parte cuando la soldadura es de manera de sesgo es decir con un ángulo de 45°, la resistencia a la fatiga mejora considerablemente.

La Tubería Flexible es una tubería electro soldada, fabricada con una costura longitudinal única, formada por soldadura de inducción de alta frecuencia. La materia prima es abastecida en planchas. Cuando el diámetro de la tubería a fabricarse se selecciona, la plancha de acero se corta en una tira continua de un ancho dado para formar la circunferencia del tubo especificado. La faja de acero es luego soldada en sesgo a otro segmento de tira para formar un rollo continuo de lámina de acero. El área soldada se desbasta hasta quedar limpia y suave, luego es inspeccionada con rayos X, para asegurarse que la soldadura esté libre de defectos. Una vez que se ha enrollado una suficiente longitud de tira continua de acero en la bobina maestra el proceso de fresado del tubo comienza.

El acero en tiras, es luego corrido a través de una serie de cuñas de rodillo, que trabajan mecánicamente la faja plana, dándole la forma de tubo, puesto que lo bordes de la tira de acero se prensan juntas mecánicamente, el proceso de soldadura longitudinal se provee con

una bobina de inducción de alta frecuencia que se coloca a unas cuantas pulgadas al frente del último juego de rodillos formadores. La bobina de inducción de alta frecuencia genera calor para soldar por la resistencia al flujo de la corriente eléctrica. El flash de soldadura expuesto en el exterior del tubo se retira y la costura soldada es anillada a temperaturas de aproximadamente 1700° F. (900° C.) Se deja enfriar el tubo y luego, se corren pruebas no destructivas de estación, para inspeccionar el cuerpo del tubo que será enrollado para su transportación.

ORIGEN

La tubería continua (tubería flexible) tiene sus orígenes en 1943 cuando en los trabajos de los equipos de ingenieros aliados durante la segunda guerra mundial con el proyecto PLUTO (Pipe Lines Under The Ocean) que comprendía el tendido de oleoductos desde Inglaterra hasta a varios puntos a lo largo de la costa de Francia para proveer de combustible a los ejércitos. La tubería continua de tres pulgadas de diámetro era enrollada en Tambores huecos (carretes flotantes) que eran arrastrados por barcos de las fuerzas aliadas.

La Tubería Flexible (Tubería Continua o Coiled Tubing) ha evolucionado a hacia un tipo de unidad portátil compacta y eficiente que elimina el problema de armar y desarmar conexiones que entran y salen del pozo. En la unidad de tubería flexible se usan longitudes continuas de tubería de tamaños variados que se almacenan en un carrete. Su longitud es usualmente suficiente para alcanzar la profundidad total del pozo, esta puede ser bajada y recuperada mientras se circulan fluidos de forma continua, y por ser un tubo continuo no se necesitan que se hagan y deshagan conexiones, y algunos de sus usos más frecuentes entre muchas otras son: moliendas de accesorios, moliendas de cemento, lavado de arena y sólidos, remoción de parafinas y asfáltenos, estimulaciones selectivas, circulación de fluidos, y pesca de herramientas atrapadas, moliendas de cemento, moliendas de accesorios de perforación. etc.

Los componentes de un equipo de tubería flexible son: Unidad de bombeo, Unidad de potencia, Carrete, cabina de control, cabeza inyectora, Conjunto de Preventores, Grúa y subestructura. Puede suministrarse en carretes de 3/4", hasta 6 5/8" y longitudes máximas de 10,000m.

En 1990, se fabricó la primera sarta de Tubería Flexible de 2" de diámetro para la terminación de un pozo, los primeros intentos de perforación con TF se realizaron en 1991. Recientemente, la perforación se ha concentrado en Texas, Canadá y Europa, sin embargo, la actividad en California, Alaska y el interés en América Latina, África y el Medio Oriente se ha incrementado.

Las operaciones que incluyen tubería flexible son cada día más frecuentes en las fases de exploración y producción de hidrocarburos, conforme se han ido reconociendo sus ventajas,

puesto que esta tecnología es apropiada para resolver problemas en el área de perforación y mantenimiento de pozos petroleros.

El uso de equipos de tubería flexible se ha extendido dentro del campo petrolero en operaciones de perforación, terminación, re-perforación, y mantenimiento de pozos ya perforados, además de servir como sartas de velocidad, y tuberías flexibles colgadas para bombeo neumático, etc.

En México se inició el uso de la tubería flexible en la Región Norte (Burgos) para la limpieza de los pozos que se tapaban con arena y parafinas, también para inducir pozos y lavado de los mismos. En la Región Sur se inició también en las operaciones de limpieza de tubería de producción al obstruirse por parafinas y asfáltenos.

Sin embargo debido a los efectos de fatiga cíclica, el fallo debido a la deformación de flexión plástica repetida de tubería flexible dentro y fuera del carrete y de cuello de cisne, es motivo de gran preocupación en las operaciones de tubería flexible.

Los factores que afectan a la vida de trabajo de tubería flexible, incluyen el tamaño de la tubería flexible y espesor de pared, la presión interna, resistencia a la elongación, diámetro del carrete, radio de cuello de cisne, condición de la operación (corrosión) (concentración de tensiones).

1.8.- MENCIÓN DE ALGUNAS OPERACIONES REALIZADAS CON TUBERÍA FLEXIBLE.

1.- Inducción con tubería flexible.

En las operaciones de inducción empleando el bombeo de nitrógeno como un medio para balancear el punto en el que el pozo aligera su columna ya que por sí solo o por la presión ejercida por el yacimiento en el pozo no fluiría, este procedimiento empieza desde el punto donde se encuentra el nivel de hidrocarburos y se hace gradualmente hasta quedar a una profundidad requerida. La cantidad de nitrógeno es determinada por la geometría del pozo.

Y se utilizan en todos los pozos petroleros que tienen una carga hidrostática mayor que la del yacimiento, esto puede ser por razones de control durante alguna intervención o cuando se tienen formaciones depresionadas, que requieren ser inducidas para mantener la producción.

2.- Limpieza de aparejo de producción.

En la operación de limpieza de aparejo con tubería flexible se lleva a cabo mediante el uso de geles, disolventes y ácidos espumados, etc.; estos productos son bombeados a través de la TF y por medio de diversas herramientas de punta como pueden ser trompos difusores,

trompos generadores de ondas vibratorias, etc., son inyectados a lo largo de la tubería de producción.

El objetivo es reestablecer las condiciones de flujo del pozo, ocasionados por problemas de arenamiento fino, incrustaciones de sales minerales y materiales solubles como parafinas y asfáltenos.

3.-Colocaciones de tapones retenedores de cemento.

Otras de las aplicaciones en la amplia gama de servicios que ofrece la versatilidad del equipo de TF, es la capacidad de bombear cemento a través de ella para efectuar diferentes operaciones de reparación de pozos tales como:

- Aislamiento de zonas productoras de agua
- Aislamiento de zonas depresionadas
- Corrección de adherencia en cementaciones primarias
- Aislado temporal de zonas productoras
- Tapón de cemento para desvío
- Abandono de pozos.

4.- Perforación.

En las operaciones de perforación con tubería flexible se lleva a cabo mediante perforación bajo balance y sobre balance empleando motores de fondo y molinos especiales para TF.

5.- Apertura de Ventana.

En las operaciones de molienda o apertura de ventana se requieren motores HPHT (alta presión y alta temperatura) y molinos de alto desempeño con incrustaciones.

1.9.-RESULTADOS ESPERADOS

Con los resultados obtenidos en este trabajo se buscará dar a conocer las etapas de fatiga para así disminuir el riesgo de fallar en una operación dañando un pozo por ruptura de la tubería flexible fatigada.

También se espera crear cultura de trabajo con datos confiables de ciclos de vida, para no forzar la herramienta y no poner en riesgo el éxito de las operaciones donde el procedimiento es muy largo y la tubería se fatiga formando micro poros invisibles al ojo

humano, donde un esfuerzo de flexión rompa la tubería y ocasione serios problemas. Los resultados de algunas pruebas muestran que la vida de tubería flexible se puede aumentar en gran medida si se aumenta el espesor de la pared, sabiendo que la vida de trabajo de tubería flexible disminuye bajo alta presión interna, la corrosión, y las condiciones de soldadura.

1.10- MÉTODOS EMPÍRICOS PARA MINIMIZAR LA FATIGA

En la industria petrolera se conocen tres métodos para minimizar y anticipar la fatiga en la TF.

1.- Método de pies recorridos: el método de pies recorridos es un método en donde el operador de la cabina de control lleva un conteo de ciclos acumulados de la sarta medidos en una, para retirar la tubería cuando esta haya llegado a su límite.

2.- Método llamado mecanismo de rutina: al utilizar este método, los operadores eliminan 20 a 50 pies de la tubería trasladando la longitud predeterminada y ayudando a separar la fatiga acumulada en el área extendida. Generalmente los operadores controlan el peso de la sarta en intervalos de 1000 pies cuando se efectúa el primer viaje en el pozo.

3.- Método de monitoreo de fatiga. Este modelo tiene como objetivo predecir la vida útil de la tubería flexible haciendo un análisis en cualquier punto de la sarta variando sus propiedades; de 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; esto como los anteriores no son modelos exactos para predecir la fatiga, sin embargo este último, en comparación con los otros anteriores, presenta mayor eficacia por identificar las secciones mayormente fatigadas, para posteriormente eliminar las secciones dañadas.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO.

2.1.- PROPIEDADES ELÁSTICAS Y PLÁSTICAS DE LA TF.

Por ser precisamente flexible, en la tubería ocurren ciclos constantes de flexión, presentándose una deformación elástico-plástica y plástica. Durante los viajes de entrada y salida del pozo se somete la TF a eventos de doblamiento y como se observa en la **Figura 2.1** con ocurrencia de dichos eventos en el carrete y en el cuello de ganso.

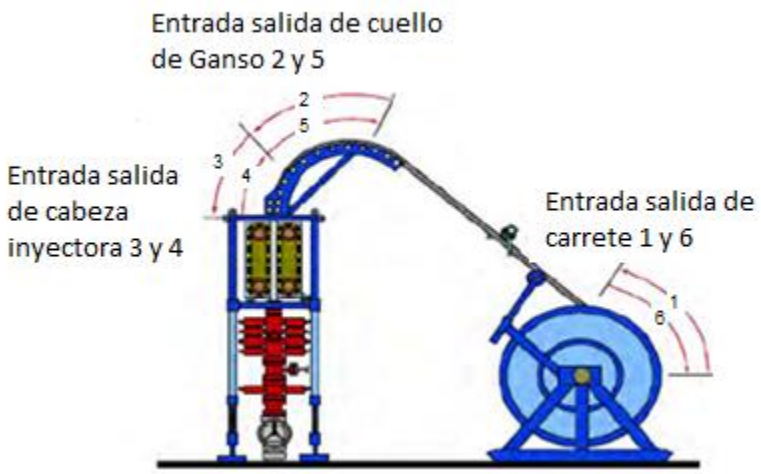


Figura 2.1.- Eventos de doblamiento, dados en el carrete y el cuello de ganso (modificado de manual de TF de la compañía Petrotec 2012)

Para poder hacer un pronóstico de la vida útil de la tubería flexible se deben conocer los factores mecánicos de la tubería tales como: diámetro interno (***di***) y diámetro externo (***do***), espesor de pared (***t***), punto de cedencia, el módulo de Young (***E***), la relación de Poisson (***V***), esfuerzo radial (***σr***), esfuerzo axial (***σa***), esfuerzo circunferencial (***σh***), y demás esfuerzos combinados y alternados presentes en la tubería. Así que conociendo estos datos, debemos hacer un análisis de esfuerzos principales, a los que está sometida la tubería, así como de los factores que debido a los mismos dañan la tubería estos son: presión interna, diámetro del carrete, radio del cuello de ganso.

ESFUERZO DE CEDENCIA

La fluencia o cedencia es la deformación irrecuperable del material, a partir de la cual sólo se recuperará la parte de su deformación correspondiente a la deformación elástica, quedando una deformación irreversible. Este fenómeno se sitúa justo encima del límite elástico, y se produce un alargamiento sin que varíe la tensión aplicada.

El fenómeno de fluencia se da cuando las impurezas o los elementos de aleación bloquean las dislocaciones de la red cristalina impidiendo su deslizamiento, proceso mediante el cual el material se deforma plásticamente.

Es el esfuerzo máximo permisible para que el material pueda regresar a su forma y tamaño original.

El punto de cedencia es cuando un material es llevado hasta su límite elástico y ocurre daño en el material.

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

El método para determinar el punto de cedencia se le conoce como método "offset" o "desplazamiento" y consiste en trazar una línea o recta paralela a la pendiente de la gráfica a partir de un valor de deformación unitaria

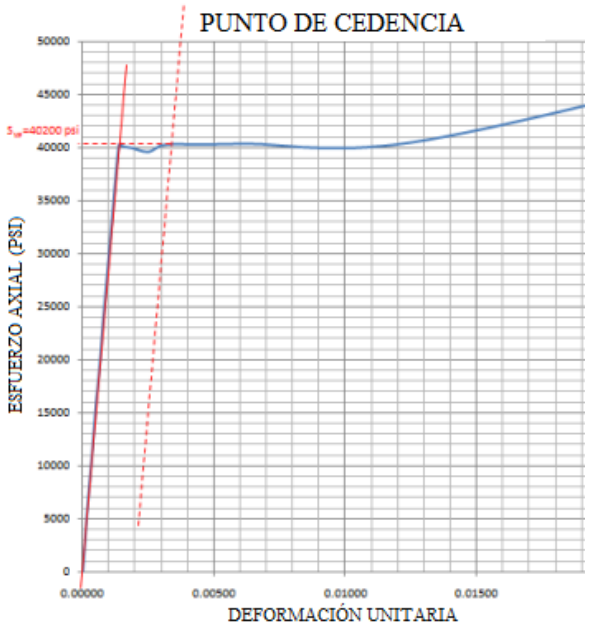


Figura 2.2.- Punto de cedencia del material

MÓDULO DE YOUNG O MÓDULO DE ELASTICIDAD

Propiedad elástica de los materiales; parámetro que caracteriza el comportamiento elástico de un material. (Módulo de Young de la TF de acero carbón $(30\ x\ 10^6\ lb/pg^2)$ (manual Halliburton 2012)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}, \tag{2.1}$$

donde:

E = módulo de Young.

σ = Esfuerzo sobre un área determinada.

ϵ =Deformación unitaria.

Se denomina módulo de elasticidad a la razón entre el incremento de esfuerzo y el cambio correspondiente a la deformación unitaria. Si el esfuerzo es una tensión o una compresión, el módulo se denomina módulo de Young y tiene el mismo valor para una tensión que para una compresión, siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo denominado límite elástico. Tanto el módulo de Young como el límite elástico, son naturalmente distintos para las diversas sustancias.

El hecho de que la variación de deformación unitaria sea directamente proporcional a la variación de esfuerzo, siempre que no se sobrepase el límite elástico, se conoce como ley de Hooke.

$$\sigma = E \,.\, \epsilon, \tag{2.2}$$

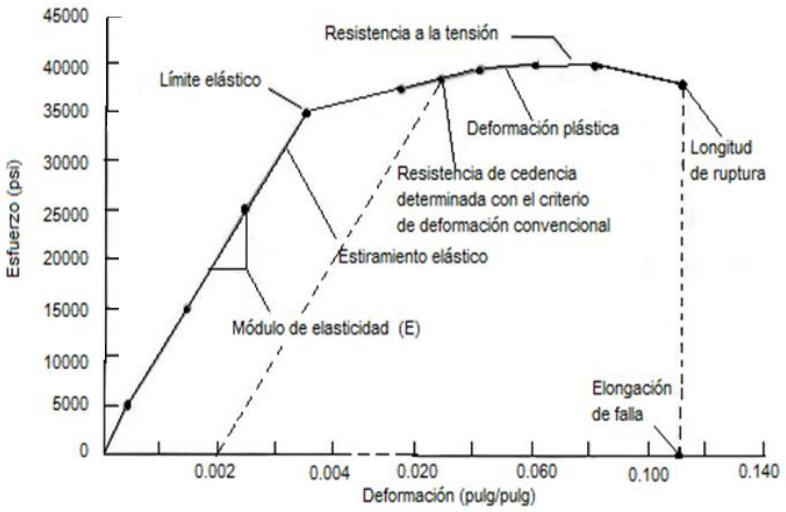


Figura 2.3.- Diagrama esfuerzo deformación para una aleación acero carbón similar a la aleación de la tubería flexible (modificada de manual de TF de la compañía Petrotec 2012).

DEFORMACIÓN

Cambio relativo en el tamaño o forma de un cuerpo debido a la aplicación de una fuerza o carga sobre este.

La deformación es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a los esfuerzos producidos, por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo o la ocurrencia de dilatación térmica.

Deformación plástica, irreversible o permanente. Modo de deformación en que el material no regresa a su forma original después de retirar la fuerza o carga aplicada. Esto sucede porque, en la deformación plástica, el material experimenta cambios termodinámicos irreversibles al adquirir mayor energía potencial elástica. La deformación plástica es lo contrario a la deformación reversible.

Deformación elástica, reversible o no permanente, el cuerpo recupera su forma original al retirar la fuerza que le provoca la deformación. En este tipo de deformación, el sólido, al variar su estado tensional y aumentar su energía interna en forma de energía potencial elástica, solo pasa por cambios termodinámicos reversibles.

Comúnmente se entiende por materiales elásticos, aquellos que sufren grandes elongaciones cuando se les aplica una fuerza, como la goma elástica que puede estirarse sin dificultad recuperando su longitud original una vez que desaparece la carga. Este comportamiento, sin embargo, no es exclusivo de estos materiales, de modo que los metales y aleaciones de aplicación técnica, piedras, hormigones y maderas empleados en construcción y, en general, cualquier material, presenta este comportamiento hasta un cierto valor de la fuerza aplicada; si bien en los casos apuntados las deformaciones son pequeñas, al retirar la carga desaparecen.

Al valor máximo de la fuerza aplicada sobre un objeto para que su deformación sea elástica se le denomina límite elástico y es de gran importancia en el diseño mecánico de la tubería flexible, ya que en la mayoría de aplicaciones es éste y no el de la rotura, el que se adopta como variable de diseño (particularmente en cuerpos elásticos). Una vez superado el límite elástico aparecen deformaciones plásticas (que son permanentes tras retirar la carga) comprometiendo la funcionalidad de ciertos elementos mecánicos.

Una forma de describir matemáticamente este fenómeno es la siguiente formula:

$$\delta = \frac{PL}{AE}, \tag{2.3}$$

donde:

δ= Deformación.

P = Fuerza o Carga.

L= longitud.

A = área determinada.

DEFORMACIÓN UNITARIA

Se puede definir como la relación existente entre la deformación total y la longitud inicial del elemento, la cual permitirá determinar la deformación del elemento sometido a esfuerzos de tensión y/o compresión.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{L}, \tag{2.4}$$

MÓDULO DE RIGIDEZ.

Cuando el material es sometido a fuerzas cortantes donde las fuerzas actuantes son paralelas al área del material, el movimiento lateral de los átomos describe un ángulo de deformación cortante y se representa por:

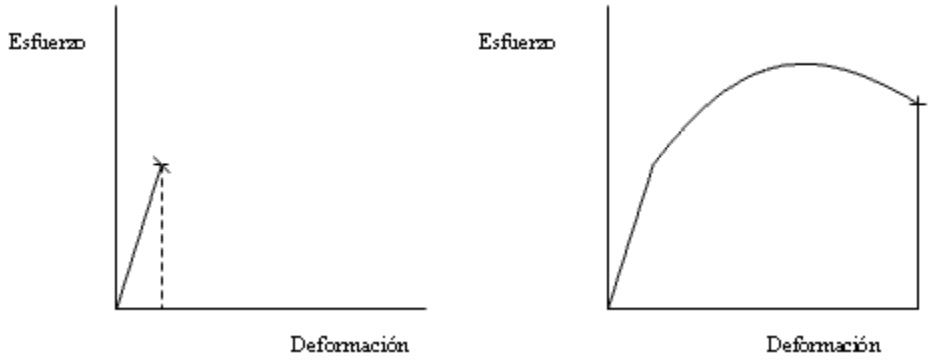


Figura 2.4.-Tenacidad de un Metal Frágil (izquierda) y de un Metal Dúctil (derecha**).** Tipo de acero empleado en TF (manual de TF de la compañía Petrotec 2012).

El módulo de rigidez o módulo de corte (G) se obtiene con la expresión:

$$G = \frac{\tau}{\gamma}, \tag{2.5}$$

donde:

G = Módulo de rigidez.

τ = Esfuerzo cortante.

γ = Deformación cortante.

El módulo de rigidez (módulo de corte) se correlaciona con el módulo de elasticidad mediante la siguiente expresión:

$$G = \frac{E}{2\,(1+v)}, \tag{2.6}$$

donde:

G = Módulo de rigidez, o módulo de cizalla.

V = Coeficiente de Poisson.

(Coeficiente de Poisson con valor de 0.29 tanto para el hierro como para el acero. Dato monografías ingeniería petrolera.)

COEFICIENTE DE POISSON

El coeficiente de Poisson corresponde a la razón entre la elongación longitudinal y a la deformación transversal en un ensayo de tracción. Alternativamente el coeficiente de Poisson puede calcularse a partir de los módulos de elasticidad longitudinal y transversal.

El coeficiente de Poisson (denotado mediante la letra griega nu o mu, *"v")* es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento. El nombre de dicho coeficiente se le dio en honor al físico francés Simeone Poisson.

se escribe así:

$$V = \frac{E}{2G} - 1, \tag{2.7}$$

donde:

V = Coeficiente de Poisson

Si se toma un prisma mecánico fabricado en el material cuyo coeficiente de Poisson pretendemos medir y se somete este prisma a una fuerza de tracción aplicada sobre sus bases superior e inferior, el coeficiente de Poisson se puede medir como: la razón entre el alargamiento longitudinal producido dividido por el acortamiento de una longitud situada en un plano perpendicular a la dirección de la carga aplicada.

Este valor coincide igualmente con el cociente de deformaciones, de hecho la fórmula usual para el Coeficiente de Poisson es:

$$v = -\frac{\varepsilon\ tangencial}{\varepsilon\ longitudinal}, \tag{2.8}$$

Para un material isótropo elástico perfectamente incompresible, este es igual a 0,5. La mayor parte de los materiales prácticos en la ingeniería rondan entre 0,0 y 0,5.

2.2.- ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN LA TUBERÍA FLEXIBLE Y EVENTOS QUE CONLLEVAN A LA FATIGA DEL MATERIAL.

La tubería flexible se fatiga debido a los ciclos constantes de flexión en su recorrido hacia dentro y fuera del pozo, a las presiones interna y externa y a los esfuerzos axiales, radiales y circunferenciales a los que es sometida a lo largo de la geometría de un pozo petrolero, estos eventos llevan a la tubería a presentar deformaciones elásticas, y plásticas.

El primer punto de deformación es al salir del carrete donde la TF permanecía enrollada, posteriormente es sometida a un esfuerzo de tensión al ser guiada hacia el cuello de cisne donde ocurre otro evento de flexión, durante un viaje de ida y vuelta la tubería es sometida a seis eventos de flexión deformante (principales esfuerzos a los que está sometida la TF, causantes de fatiga).

Para hacer un análisis es necesario conocer los esfuerzos de doblamiento, circunferenciales y alternados.

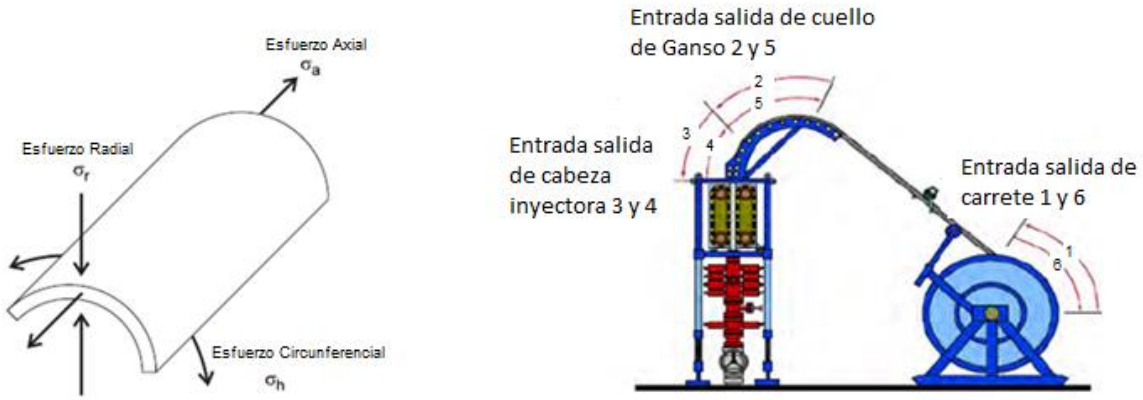


Figura 2.5.- Principales esfuerzos de doblamiento de la TF (Modificado de manual de TF de la compañía Petrotec 2012)

Definiendo los esfuerzos

Esfuerzo Axial: Este puede ser positivo a tensión y negativo a compresión. Debido a los eventos de doblamiento y por su mismo peso y/o la tensión de la tubería, llena o vacía, en caso de estar lleno de fluido su peso aumentara a razón de peso más presión hidrostática ejercida por el fluido.

$$\sigma_a = \frac{F_a}{A} \quad , \tag{2.9}$$

O bien

$$\sigma_a = \frac{F_a}{A} + \frac{F_e R r_o}{2I} \ , \tag{2.10}$$

donde:

$\sigma_a = Esfuerzo\ axial$

$F_a = Fuerza\ real\ a\ tension\ donde\ F_a = F_e + A_i P_i - A_o P_o$

$F_e = Fuerza\ efectiva\ donde\ F_e = w\ x\ L$

$R = Espacio\ anular\ entre\ pared\ de\ tuberia\ del\ pozo\ y\ TF$

$r_o = Radio\ exteror\ de\ la\ tuberia$

$I = Momento\ de\ inercia\ de\ la\ tuberia\ donde\ \frac{\pi}{64}\ (d_0^4 - d_i^4)$

$di = Diámetro\ interno\ de\ la\ TF$

$do = Diámetro\ exterior$

Esfuerzo Radial: Es el esfuerzo ejercido por la presión externa e interna a la que se somete el radio de la tubería Flexible.

$$\sigma_r = \frac{-Pi\ ri^2(ro^2 - r^2)}{r^2\ (ro^2 - ri^2)}, \tag{2.11}$$

donde:

$\sigma_r = Esfuerzo\ radial$

$Pi = presión\ interna$

$r = radio\ entre\ ri\ y\ ro$ (rango de esbeltes denotado por D/t)

$r_o = Radio\ exteror\ de\ la\ TF$

$ri = radio\ interno\ de\ la\ TF$

Presión Externa.- Presión ejercida por los fluidos en el pozo.

Presión Interna.- Está dada por el peso de la columna de fluido dentro de la tubería más la presión de bombeo a la que esté sometida.

$$P_i = Ph + Pb, \tag{2.12}$$

donde:

$Pi = presión\ interna$
$Ph = presión\ hidrostática$
$Pb = presión\ de\ bombeo$

Debido a que los esfuerzos siempre se presentan en el interior o exterior de la tubería actuando sobre el espesor de la pared entonces:

Para esfuerzo radial interior

$$\sigma_r = -d_i, \tag{2.13}$$

Para esfuerzo radial exterior

$$\sigma_r = -d_o \ , \tag{2.14}$$

donde:

$t = Espesor\ de\ pared$

$OD = Diámetro\ exterior(cm)$

Esfuerzo Circunferencial: Es el esfuerzo alrededor de la circunferencia de la TF debido a las presiones internas y externas.

$$\sigma_h = \frac{(r_i^2 + r_o^2)P_i - 2r_o^2 P_o}{r_o^2 - r_i^2}, \tag{2.15}$$

Continua desarrollo de tema y ejemplos en apéndices anexas.

2.3.- VON MISES

Al Aplicar el criterio Von Mises conoceremos los límites elásticos y plásticos de la tubería flexible, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\sigma_{VME} = \sqrt{\frac{1}{2}\{(\sigma_h - \sigma_r)^2 + (\sigma_h - \sigma_a)^2 + (\sigma_a - \sigma_r)^2\}}, \quad (2.16)$$

Continua desarrollo de tema y ejemplos en apéndices anexas.

2.4.-MÁXIMO ESFUERZO DE DOBLAMIENTO DE LA TF EN EL CARRETE Y CUELLO DE GANSO SEGÚN AVAKOV.

Están definidos con las siguientes ecuaciones":

Para carrete:

$$S_{or} = \frac{d_o\, E}{D_r + d_o}, \quad (2.17)$$

Para cuello de ganso:

$$S_{ag} = \frac{d_o\, E}{(R_G + \frac{d_o}{2})}, \quad (2.18)$$

donde:

S_{or} = esfuerzo de doblamiento de la TF en el carrete

S_{ag} = esfuerzo de doblamiento en el cuello de ganso

d_o = Diámetro exterior de la TF

E = Modulo de Young de la TF $(30\ x\ 10^6\ lb/pg^2)$

D_r = Diámetro del carrete

R_g = Radio del cuello de ganso

El esfuerzo circunferencial debido a la presión interna en la TF está dada por

$$S_h = \frac{2d_i^2 P_i}{d_o - d_i^2}, \tag{2.19}$$

donde

S_h = Esfuerzo circunferencial de la TF debido a la presión interna

d_i = diámetro interior de la TF

AVAKOV en su modelo de fatiga define esfuerzos alternados de la TF como:

$$S_r = S_{ar} + (S_h)^{1.895}, \tag{2.20}$$

$$S_g = S_{ag} + (S_h)^{1\,895}, \tag{2.21}$$

donde:

S_r = Esfuerzo alternado equivalente en el carrete.

S_g = Esfuerzo alternado equivalente en el cuello de ganso.

El recorrido total de la TF antes del daño según" AVAKOV" se calcula de la siguiente manera:

$$T_s = \frac{K_c K_s K_m K_Q N_m}{\left(\frac{S_r}{S_m}\right)^2 + 2\left(\frac{S_g}{S_m}\right)^2}, \tag{2.22}$$

donde:

$k_c = Factor\ de\ corrosion\ de\ TF = 0.5 - 1.$

$k_m = Factor\ de\ compensación\ del\ esfuerzo\ de\ cedencia\ de\ la\ TF$

$k_Q = Factor\ de\ predicion\ de\ vida\ de\ la\ TF = 0.5 - 1.$

$k_s = Factor\ de\ concentracion\ de\ esfuerzos\ de\ TF = 0.33 - 1.$

$N_s = Promedio\ de\ ciclos\ de\ vida\ de\ la\ TF = 130.$

$S_r = Esfuerzos\ alternados\ equivalentes\ presentes\ en\ el\ carrete\ (psi)$

$S_g = Esfuerzos\ alternados\ equivalentes\ presentes\ en\ el\ cuello\ de\ ganso\ (psi)$

$S_m = Esfuerzos\ de\ daño\ en\ la\ TF\ = 10^6\ \ (psi)$

Factor de compensación del esfuerzo de cedencia de la TF.

Está determinado por:

$$K_m = \left[\frac{ln(1-RA/100)}{\ln(0.47)}\right], \tag{2.23}$$

donde:

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

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

Tabla 2.1.- Factores compensación y reducción de área (Manual de TF Petrotec 2012)

Tubería Flexible	RA	K_m
QT-700	53	1
QT-800	57	1.11
QT-900	61	1.25
QT-1000	65	1.39
QT-1100	69	1.55

2.5.- INTRODUCCIÓN A LA PERFORACIÓN CON TUBERÍA FLEXIBLE.

Las aplicaciones de la tubería flexible recientes han incluido la perforación en varias secciones del agujero, la atención de la industria de la tubería flexible se ha centrado en la re-perforación de pozos petroleros.

La perforación con TF es de gran interés para la industria de la perforación de pozos petroleros; por ser tubería continua podrá salir y entrar con facilidad y en menor tiempo.

Sin embargo una de las preocupaciones acerca del uso de la tubería flexible en la perforación, ha sido la pregunta de ¿Qué tan derecho queda el agujero?, debido a la falta de collares en la tubería flexible, se ha demostrado que la rectitud del agujero no se afecta, para la tubería flexible esto es despreciable ya que se requiere mucho menor peso sobre la barrena en un sistema de tubería flexible de alta velocidad.

Los sistemas de tubería flexible pueden ser usados en conjunción con un equipo convencional en varias aplicaciones por ejemplo:

Un equipo convencional se usara para perforar la mayor parte del pozo y la tubería flexible para las zonas críticas.

Perforación con tubería flexible (CTD por sus siglas en inglés Coiled Tubing Drilling) se ha utilizado de forma comercial durante muchos años, y puede proporcionar importantes beneficios económicos. Además de las posibles ventajas de costos, CTD puede proporcionar los siguientes beneficios adicionales:

En general, CTD se puede dividir en dos categorías principales que consisten en pozos direccionales y no direccionales. Pozos no direccionales utilizan un conjunto de perforación bastante convencional. La perforación direccional requiere el uso de un dispositivo de orientación para dirigir la trayectoria del pozo.

POZOS CONVENCIONALES.

Pozos no direccionales representan la mayor aplicación CTD, y estos se definen como un bien que carece de herramientas de fondo de pozo para el control de la dirección, la inclinación y / o azimut. Gran parte del trabajo realizado hasta la fecha con CTD involucrado el desarrollo del pozo de gas superficial en Canadá, pero también se ha utilizado para los pozos de inyección de agua superficial y de las operaciones de "acabado". Una ventaja principal que ofrece CTD en esta aplicación es la velocidad de la operación de la plataforma arriba / abajo, y la tasa de penetración continua (sin retrasos que pudiera tener un tubo articulado).

La mayor parte de estos trabajos se han realizado con los tamaños del agujero de menos de 7 pulgadas, pero el tamaño de los agujeros de hasta 2" pulgadas se han perforado con éxito. Gran parte como en la perforación convencional, collares de perforación se pueden usar en pozos de bajo ángulo de inclinación para controlar la acumulación y aplicar peso sobre la barrena para aplicaciones de CTD.

PERFORACIÓN DIRECCIONAL

Este tipo de aplicación utiliza un dispositivo de orientación en el montaje de fondo de pozo para controlar la trayectoria del mismo.

La perforación direccional con TF tiene algunas diferencias fundamentales en comparación con las técnicas de perforación convencional. Una de las diferencias básicas es la necesidad de un dispositivo de orientación para controlar la trayectoria del pozo.

En cuanto a la hidráulica, hay algunos parámetros de diseño en el fluido, que son clave a tener en cuenta para las aplicaciones de perforación con tubería flexible en comparación con la perforación rotativa tradicional. Por ejemplo, todas las operaciones de CTD requieren el fluido en toda la sarta de tubería durante todo el viaje, independientemente de la profundidad de perforación. Por lo tanto, para un rendimiento hidráulico óptimo, el fluido de perforación debe comportarse como un fluido de baja viscosidad para dentro de la TF, y como un fluido de alta viscosidad en el espacio anular (para recuperación de recortes eficiente).

Otra diferencia es la ausencia de rotación de la tubería flexible durante la perforación. Mientras que una tubería de perforación gira y este movimiento ayuda a mantener los recortes de perforación en suspensión en el fluido de perforación, por lo que puede ser levantado a la superficie. Puesto que la TF no gira, la limpieza del pozo puede ser más difícil y más aún para pozos desviados. Este efecto se ve compensado en parte por los cortes más pequeños producidos con CTD (RPM más alta, menor peso en barrenas o

molinos). Además, los fluidos especiales con propiedades visco-elásticas han sido desarrollados para CTD, que cambian su reología de acuerdo con la velocidad de cizallamiento local, es decir, ser más viscoso en el espacio anular (velocidad de cizallamiento inferior) para mejorar el corte de suspensión.

2.6.- VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE PERFORACIÓN CON TF.

Ventajas.

En teoría mayor velocidad de penetración, menos personal e importante reducción de costos y tiempo de perforación por el tiempo de viaje, este será continuo sin parar para realizar uniones, por ser continua elimina la necesidad de conexiones, y esto a su vez elimina la posibilidad de accidentes al momento de realizar conexiones.

La TF permite circulación continua mientras que baja y al momento de hacer contacto, la circulación continua podría traducirse en perforación continua. Además de tener mayor control de trayectoria, así como el monitoreo de parámetros de fondo de pozo.

Desventajas de la perforación con tubería flexible.

Además de poco peso sobre la barrena la perforación con tubería flexible está limitada a agujeros de tamaño pequeño, el diámetro externo de la TF y la capacidad de torque imponen limites en el tamaño del agujero que se puede perforar, y la mayoría de los trabajos que se pueden realizar son con TF de 1 ½” y 1 ¾” de diámetro y hasta 2”, y aun que existen tuberías flexibles de 5” de diámetro solo que no hay equipos que puedan correr ese diámetro.

Se presentan limitaciones en la profundidad del pozo, debido a las restricciones de peso más que por la resistencia mecánica de la tubería, y mientras mayor sea el diámetro es menor la longitud que se puede transportar.

La perforación en agujero descubierto puede someter a la tubería a condiciones de carga no recomendables, ocasionando que la pared del tubo se dañe al tratar de forzarla dentro de un agujero con irregularidades.

Para evaluar la influencia de los "defectos" en un grado particular, se requiere un gran número de pruebas, es necesario evaluar una amplia gama de defectos, una geometría con defecto particular y otros parámetros que influyen en la fatiga también deben ser

examinados. Estos incluyen diámetro, espesor de pared, radio de curvatura, y la presión interna.

Al entrar y salir del pozo, la TF experimenta repetidas veces el efecto de doblar y desdoblar dentro y fuera del carrete y de cuello de ganso. La alternancia de las tensiones de flexión provoca la deformación plástica y fallo por fatiga de la tubería flexible. La presión de trabajo interno en espiral también produce una tensión circunferencial.

A medida que la tubería flexible acumula carreras de trabajo (carrera de trabajo significa un solo recorrido de tubería flexible de entrada y salida del pozo, incluyendo un ciclo de plegado dentro y fuera del carrete y dos ciclos de flexión dentro y fuera del cuello de ganso), la tubería flexible y su diámetro decrece gradualmente debido a la elongación ocasionada, por el efecto del peso de la misma; esto conlleva a desarrollar pequeñas grietas en la superficie de la tubería flexible, resultando finalmente en el fallo del material de la tubería flexible.

2.7.-ASPECTOS RELEVANTES PARA LA PERFORACIÓN CON TF

En el diseño de las sartas de perforación con tubería flexible se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:

Limites elásticos: aplicando la ley de Hooke que establece que el esfuerzo es igual a la deformación multiplicada por el módulo de Young, tal como se explica en los problemas dentro del apéndice.

Efecto de abombamiento: evitar presiones altas, el incremento en el diámetro de la tubería es debido a la presión interna que existe en la tubería durante los seis eventos de flexión, al ocurrir este efecto de abombamiento las paredes se adelgazan pudiendo ocurrir un estallamiento.

Colapso en la TF: debido a los esfuerzos axiales y de presión interna la tubería puede colapsar, esto depende de la ovalidad, resistencia a la cedencia y 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 definirse con la siguiente ecuación:

$$Ovalidad = \left(\frac{OD - ID}{OD}\right), \quad (2.24)$$

donde:

OD= diámetro exterior

ID= diámetro interior

Resistencia a la cedencia: mientras se apliquen cargas de tensión menores a la cedencia la tubería comenzará a estirarse permanentemente y debajo de cuello de ganso se aplicará el punto máximo de tensión.

Pandeo en TF: un factor muy importante que causa el pandeo en la tubería es la fuerza de compresión aplicada a la sarta esto puede ocurrir en cualquier sección del pozo. Existen dos tipos de pandeo Senoidal y Helicoidal.

Pandeo senoidal:

Ocurre al hacer un efecto de gusano en las paredes del tubo del pozo, si la carga de compresión desde la superficie excede la carga de pandeo crítica, la tubería comienza a pandearse y por lo tanto ocurre un pandeo senoidal

Pandeo helicoidal:

Pandeo donde la TF hace espiral recargado en la pared del pozo, en el pandeo helicoidal se debe tomar en cuenta que al incrementar el diámetro de la TF, la rigidez aumenta, el peso aumenta y el espacio anular disminuye.

Pandeo senoidal para pozos horizontales:

En estos pozos la TF está bajo compresión debido a la carga sobre la barrena cuando la compresión excede la carga de pandeo crítico ocurre un pandeo

Pandeo helicoidal en pozos horizontales:

si la carga compresiva axial se eleva ocurrirá un pandeo

Peso flotado (W_e): este peso está dado por la siguiente ecuación:

$$F_b = 1 - \frac{\rho_m}{\rho_a}, \tag{2.25}$$

donde:

$\rho_m = densidad\ del\ fluido\ de\ perforación\ (\frac{lb}{gal})$

$\rho_a = densidad\ del\ acero\ (65.5\ \frac{lb}{gal})$

O bien en el sistema métrico

$\rho_m = densidad\ del\ fluido\ de\ perforación\ (\frac{gr}{cm3})$

$\rho_a = densidad\ del\ acero\ (7{,}86\ \frac{gr}{cm3})$

Desarrollo de ejemplos de pandeos en apéndices anexas.

Diseño de ensamble de fondo para perforación con TF

- Conectores
- Desconectores hidráulicos
- Válvulas de circulación
- Lastrabarrenas
- Mule shoe sub para alinear herramienta de inspección
- Motores de fondo
- Barrenas y molinos

La perforación con TF tiene como objeto principal optimizar los costos y tiempos de perforación así como incrementar la seguridad, basándose en los siguientes incisos:

a) Eliminar la necesidad de sacar el aparejo de producción en apertura de ventana.

b) Permitir la perforación con pozo en bajo balance, lo que incrementa la ROP (Rate of Perforation en español es velocidad de perforación) significativamente.

c) Viajes más rápidos y más seguros (capaz de contener presión y eliminando la necesidad de tener personal maniobrando debajo de carga izada).

d) Confiabilidad de la Comunicación con herramientas a través de cable (no a través del fluido).

e) Diámetro mínimo de paso de herramientas.

f) Requerimiento de perforar bajo balance para eliminar daño al yacimiento por invasión de fluidos, esta práctica es definitivamente utilizada en casi todas las PTF.

g) Perforación de ventanas y/o laterales, donde no requieres construir el pozo desde cero, sino que se requiere aprovechar el pozo original para construir una lateral o profundizar el pozo (siempre y cuando el diámetro de las herramientas direccionales puedan pasarse a través de la Tubería de Producción). Esta representa la mayor aplicación y ventaja, porque no se requiere de un equipo de perforación.

Levantar los recortes a superficie.

En el caso de la TF se tiene la ventaja de que se puede bombear de forma continua. Para el diseño se considera una TF de gran diámetro (mayor a 1.5" porque permite bombear a mayor gasto que una TF de menor diámetro comúnmente utilizadas en operaciones de mantenimiento de producción.

a) Deberá ser una TF que permita alcanzar el gasto suficiente para levantar los recortes y que tenga la capacidad de tensión suficiente (al menos 15-20 mil libras de tensión disponibles en el fondo - margen de jalón en el fondo). Por lo general para perforación direccional se utiliza una TF con cable de registro, este cable reduce el espacio interno de la TF y eso reduce la capacidad de gasto, entonces por lo general diámetros de TF de al menos 2" son consideradas sartas apropiadas para aplicaciones de PTF.

b) La reología que podrá manejar la TF dependerá del diámetro, a mayor diámetro de TF se podrá manejar mayor reología. Con la TF se puede manejar fluidos espumados y es lógico tratar de aprovechar la posibilidad de perforar bajo balance, bajo este principio no se requieren lodos con alta reología (en muchos casos no se utilizan lodos), se usa espuma base agua y geles, los cuales son fluidos limpios libres de sólidos, que adicionalmente incrementan la vida útil de motores y herramientas. Por lo general se utiliza un equipo de retorno compacto (MPFS) que es capaz de romper la espuma, manejar el gas de formación (separarlo), separar los sólidos, filtrar el agua, reutilizarla (para circulación continua) y preparar más espuma, disminuyendo el uso de agua adicional (en el caso de operaciones de costa afuera el agua no es una limitante pero en el caso de operaciones de tierra la disponibilidad de agua es un problema). Por lo general la cantidad de fluidos requerido para perforar con TF en mucho menor que los grandes volúmenes acostumbrados a utilizar en una etapa de perforación convencional, debido en primer lugar a que el volumen/capacidad del pozo es menor y hay poca perdida de fluidos al yacimiento.

La PTF tiene que ser muy bien planeada y hay que tener en cuenta las desventajas principales como son:

1.- La imposibilidad de rotar la sarta de TF, que en comparación con una sarta de perforación convencional representa una limitación, sin embargo los problemas de atrapamiento por solidos son muy pocos a razón de que generalmente la perforación es bajo balance.

2.- Los principales problemas de atrapamiento es debido a pegaduras, y estos, generalmente son solucionados desplazando la sarta con N2.

3.- La capacidad de tensión (jalón) son menores que las capacidades de un equipo de perforación convencional, por lo tanto se opera de una forma diferente.

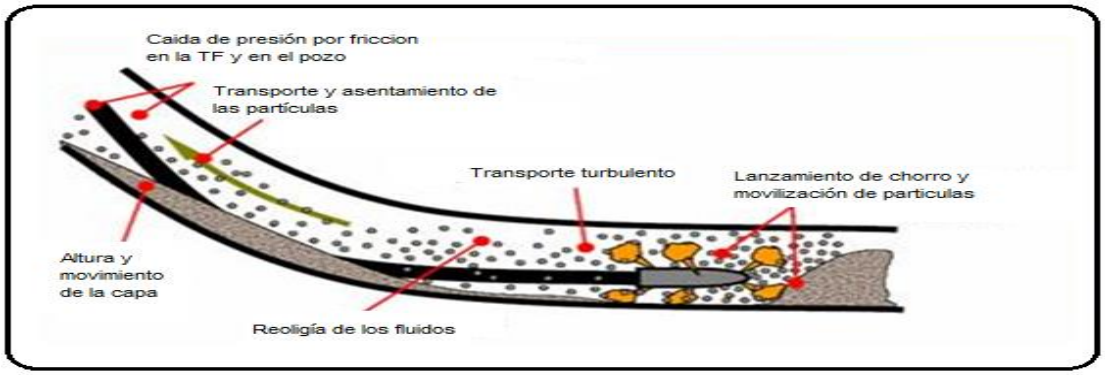


Figura 2.6.- Remoción de asentamientos de partículas con TF en pozos horizontales (Diplomado de actualización en ingeniería petrolera Pemex 2011).

La perforación con tubería flexible utiliza una columna continua de tubería para perforar. A diferencia de la tubería convencional de perforación, la cual debe ser roscada para formar la sarta de perforación, la tubería flexible viene en un carrete que se desenrolla a medida que la perforación progresa, y es enrollada en su carrete durante los viajes. El empleo de tubería flexible facilita considerable mente el descenso y la recuperación de la sarta. Como se puede apreciar en la figura:

Figura 2.7.- Equipo de perforación de pozos con tubería flexible. (es.jereh-pe.com 2015)

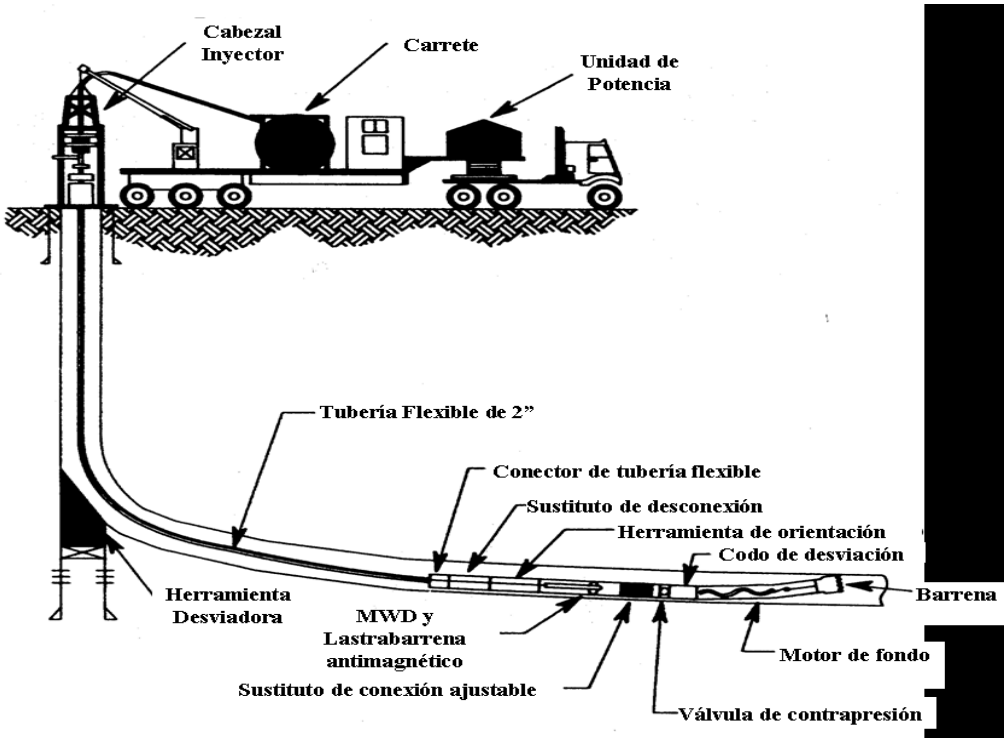


Figura 2.8.- Esquema de perforación desviada con TF. (Diplomado de actualización en ingeniería petrolera Pemex 2011).

Las consideraciones del diseño son: Geometría del pozo, profundidad desarrollada, asentamiento de tuberías, trayectoria del pozo, barrena, ensamble de perforación, estabilidad del agujero, fluidos de perforación e hidráulica. Los mínimos pesos sobre la barrena que se recomiendan por el autor del diplomado "Actualización en ingeniería petrolera de acuerdo a los diámetros son: de 3 ¾" a 4" 1000 lbf, de 4 1/8" 1500 lbf, de 5 a 6 ¼" 2500 lbf

Fluidos para perforación con TF

Los fluidos que se utilizan para la PTF son lodos base polímeros y a base de salmueras libres de sólidos, también se pueden utilizar lodos a base aceite, pero no son muy recomendables en este tipo de tecnología por que dañan los elastómeros de los motores de fondo.

Se deberá considerar la viscosidad, densidad, salinidad y ph; otro aspecto importante a considerar es la presencia de lutitas o formaciones con alto contenido de arcillas, ya que estas son sensibles a la humedad y se hinchan con agua, ocasionando una reducción en el diámetro de agujero.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DE LA PROBLEMÁTICA

3.1.- DESARROLLO DE FISURAS EN LA TUBERÍA.

Cuando un material se dobla a tal grado que el nivel de esfuerzo va más allá del límite elástico y alcanza el punto de cedencia, ocurre la deformación permanente.

Cuando la tubería flexible se dobla y desdobla repetidamente entre el carrete y el cuello de ganso, esta excede su límite elástico y es forzada a deformarse plásticamente. Cuando hay cedencia plástica repetida, la falla por fatiga ocurre eventualmente. Por lo tanto es importante conocer cuál será la vida de fatiga o resistencia a la fatiga esperada en la tubería cuando esta se cicle a condiciones diferentes.

La vida de fatiga esperada dependerá del grado de material, el espesor de pared y presión interna. La fatiga es un factor crítico en la vida de la TF ya que esta es inevitable.

La fatiga a menudo se clasifica bajo las siguientes categorías:

Fatiga de alto ciclado. La carga es básicamente elástica y la falla ocurre después de un exceso de 10,000 ciclos de esfuerzo. Ejemplos incluyen bombas triplex, ejes y rodamientos, y cualquier elemento sometido a vibraciones mecánicas.

Fatiga bajo ciclado. La carga es principalmente elástica, y l falla ocurre en 1,000 – 10,000 ciclos de esfuerzo. Ejemplos son aquellos donde la carga normalmente es baja pero se pueden ver picos ocasionales, tales la absorción de un impacto de tubo en el interior de un pozo horizontal.

Ciclo de fatiga ultra bajo. La carga es plástica y la falla ocurre en menos de 1,000 ciclos de esfuerzo. Ejemplo el doblamiento de un alambre el cual se rompe en pocos ciclos.

Al doblarse la tubería flexible se alcanza el radio donde el material comienza a ceder plásticamente. Las dimensiones del equipo de la tubería flexible moderno están por debajo del radio de cedencia mínimo. Para la tubería flexible de 1.5” de diámetro exterior con una fuerza de cedencia de 70,000 psi, el radio mínimo de dobladura elástico es de 321 pulgadas. El equipo de tubería típico usado para este tamaño de TF tiene un radio de núcleo del carrete de 40 pulgadas y un radio de guía de tubería de 72 pulgadas.

El primer parámetro de ciclado ultra bajo en la tubería flexible es el radio mínimo de dobladura cíclica. El segundo parámetro en importancia es la presión interna durante un

evento de doblamiento. La resistencia a la fatiga disminuye cuando disminuye el radio de dobladura mínimo disminuye y la presión interna disminuye. Al salir la TF de las cadenas del inyector, esta experimenta fatiga de bajo ciclado al tensionarse axialmente por su propio peso o carga aplicada y es comprimida al ser empujada en secciones horizontales del pozo. La TF experimenta un alto ciclo de fatiga por la vibración ocasionada por los pulsos de presión que ocurren por los ciclos de succión y descarga de las bombas triplex de alta presión.

La fatiga por ciclado ultra bajo en tubería flexible lleva eventualmente a la formación de micro grietas. Bajo el ciclado continuo la grieta se propagará a través de la pared de la tubería hasta que una grieta penetre completamente causando la perdida de integridad de presión, normalmente esto aparecerá como una perforación, la cual, debido a su tamaño microscópico, puede no ser detectada visualmente o mostrar perdida de presión durante las pruebas de pre-trabajo. Las grietas continuarán propagándose alrededor del cuerpo del tubo hasta que la fuga sea apreciable o haya un rompimiento. A altas presiones internas, las grietas se pueden propagar desde el inicio casi espontáneamente alrededor de la circunferencia de la TF, causando grietas transversales y una posible partición completa de tubería.

El crecimiento de una fisura requiere ser medido y para esto se utiliza el factor de intensidad de esfuerzos, en mecánica de fracturas existe un factor que se representa por la letra K y puede expresarse así:

$$K = F_{\sigma}\sqrt{\pi\alpha}, \tag{3.1}$$

donde:

$K = factor\ de\ intensidad\ de\ esfuerzos\ de\ tensión.$

$F = función\ en\ longitud\ de\ la\ fisura.$

$\alpha = longitud\ de\ la\ fisura.$

Dado que K y σ son proporcionales para una longitud de fisura, según la ecuación el máximo, mínimo, el alcance y la relación R para K durante un ciclo de carga se dan por:

$$Kmax = F_{\sigma}max\sqrt{\pi\alpha}\,, \tag{3.2}$$

donde:

F=función en longitud de la fisura.

α=longitud de la fisura.

$$Kmin = F_{\sigma} min\sqrt{\pi\alpha}\,, \tag{3.3}$$

Para variaciones en la tensión

$$\Delta K = Kmax - Kmin\,, \tag{3.4}$$

donde:

$\Delta K = Variacion\ de\ la\ tensión.$

Para un cociente de intensidad de esfuerzos de tensión

$$R = \frac{Kmax}{Kmin}, \tag{3.5}$$

donde:

R = cociente de intensidad de esfuerzos de tensión.

Hay tres diferentes estados de un material durante el crecimiento de la fisura, en la que la geometría, condiciones de medio ambiente, esfuerzos y material tienen una gran influencia en el comportamiento del material, los cuales son:

1 Inicialización.

2. Propagación.

3. El rápido crecimiento inestable y falla de estructura.

Para un crecimiento lento, en general la curva parece acercarse a una asíntota vertical denotada por ΔKth, que se llama el umbral de fatiga del crecimiento de fisuras. Esta cantidad se interpreta como un valor más bajo limitado de ΔK por debajo del cual el crecimiento de fisura no ocurre ordinariamente. En valores intermedios de ΔK, hay a menudo un tipo de línea recta de comportamiento en lo que sería un gráfica log-log como en este caso.

3.3.-FATIGA POR CORROSIÓN EN LA TF.

La corrosión se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. De manera más general, puede entenderse como la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción electroquímica (oxidación), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, de la salinidad del fluido en contacto con el metal y de las propiedades de los metales en cuestión. Otros materiales no metálicos también sufren corrosión mediante otros mecanismos. El proceso de corrosión es natural y espontáneo.

La corrosión es una reacción química (oxido-reducción) en la que intervienen tres factores: la pieza manufacturada, el ambiente y el agua, o por medio de una reacción electroquímica.

Los factores más conocidos son las alteraciones químicas de los metales a causa del aire, como la herrumbre del hierro y el acero o la formación de pátina verde en el cobre y sus aleaciones (bronce, latón).

Sin embargo, la corrosión es un fenómeno mucho más amplio que afecta a todos los materiales (metales, cerámicas, polímeros, etc.) y todos los ambientes (medios acuosos, atmósfera, alta temperatura, etc.)

La fatiga por corrosión ocurre por acción de una tensión cíclica y ataque químico simultáneo. Lógicamente los medios corrosivos tienen una influencia negativa y reducen la resistencia a fatiga, incluso la atmósfera normal afecta a algunos materiales. A consecuencia pueden producirse pequeñas fisuras o picaduras que se comportarán como concentradoras de tensiones originando grietas. La de propagación también aumenta en el medio corrosivo puesto que el medio corrosivo también corroerá el interior de la grieta produciendo nuevos concentradores de tensión.

Este tipo de corrosión ocurre generalmente en superficies expuestas al oxígeno diatónico disuelto en agua o al aire, favorecido por altas temperaturas y presión elevada.

Análisis de corrosión en la tubería flexible

La corrosión por picaduras es uno de los tipos de corrosión localizada más común y peligrosa que se dan en metales en contacto con materiales acuosos.

La corrosión por picaduras constituye un tipo de daño grave a causa de la rapidez con la que puede llegar a perforar la tubería.

La corrosión por picaduras se caracteriza por un ataque corrosivo localizado, en otras palabras se trata de un ataque que afecta zonas relativamente pequeñas en comparación con la superficie expuesta.

Si esta se produce en un área del metal relativamente pequeña la corrosión actúa como ánodo, el ataque progresa en profundidad y la picadura resultante se describe como profunda, pero si por el contrario el ataque es más extenso y no tan profundo la picadura se denomina como superficial.

El origen de la corrosión por picaduras está en la rotura de la capa pasivante, rotura que determina la aparición de zonas activas en la superficie del metal, ya que va seguida por una pila electroquímica. El ánodo de esta pila es un área pequeña de metal activo, mientras que el cátodo es un área considerablemente pasivado.

Por otra parte el metal pasivado, resistente a la corrosión, que rodea el ánodo, y el carácter activador de los productos de corrosión, formados en el interior de la picadura, agudizan la tendencia del ataque a penetrar en el metal, más que a extenderse a lo largo de la superficie.

Análisis de la susceptibilidad a la corrosión por picaduras

La norma ASTM G 61- 78 describe un procedimiento de ensayo cíclico de polarización potenciodinámica para determinar la susceptibilidad relativa a la corrosión localizada, aplicable a aleaciones hiero carbón y níquel en presencia de cloruros. Dos son los parámetros que caracterizan esta susceptibilidad.

El potencial para la cual aumenta de manera notable la corriente anódica, o el potencial de rotura de la pasivación. Cuanto más notable es este potencial, menor es la susceptibilidad de la aleación a la corrosión por picaduras.

El segundo parámetro de interés es el potencial para el cual se completa el bucle de histéresis, cuando se hace el barrido para potenciales decrecientes. En general, una vez iniciada la corrosión localizada, puede propagarse bajo un potencial más electropositivo que el cierre del bucle. Por tanto, cuanto más electropositivo sea este último, menor será la tendencia a la corrosión por picaduras.

En el caso del acero, la reacción anódica que tiene lugar es:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-} , \tag{3.32}$$

Consecuentemente, una reacción catódica tiene que tener lugar para iniciar y mantener la corrosión metálica.

Un ejemplo de reacción catódica es la reducción de protones.

$$2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2, \tag{3.33}$$

La reacción de corrosión total será la suma de ambas reacciones.

$$Fe + 2H^+ \rightarrow Fe^{2+} + H_2, \tag{3.34}$$

Tanto la reacción anódica como catódica dan lugar a corrientes llamadas anódica y catódica respectivamente y la corriente total suma de ambos procesos es proporcional a la velocidad de corrosión. Conclusión una TF que presenta corrosión puede llegar a romperse y generar un pescado en el pozo.

3.4.- DAÑO ACUMULADO

Los estudios sobre de la fatiga se realizan asumiendo una amplitud constante de esfuerzos aplicados sobre un material dado, sin embargo para la tubería flexible en su gran variedad de condiciones de servicio, los componentes están sometidos a historiales de esfuerzo en donde las cargas no poseen una amplitud constante, es decir el daño progresivo del material se produce a diferentes niveles de esfuerzos cíclicos cada uno de los cuales produce un daño sobre el mismo. El deterioro de los materiales bajo estas condiciones es conocido como Daño acumulado.

Hablando de fatiga existen tres condiciones que deben ocurrir para generar un daño, los cuales son:

Un esfuerzo máximo de tensión con una magnitud elevada, una variación o fluctuación en dicho esfuerzo, un número suficiente de fluctuaciones o ciclos carga aplicados sobre el material.

La falla por fatiga se puede dividir en tres etapas. La etapa de iniciación de grietas, en la cual el esfuerzo variable sobre algún punto genera una grieta después de cierto tiempo. La etapa de propagación de grietas, que consiste en el crecimiento gradual de la grieta. Finalmente, la etapa de fractura súbita, que ocurre por el crecimiento inestable de la grieta.

Curvas s-n

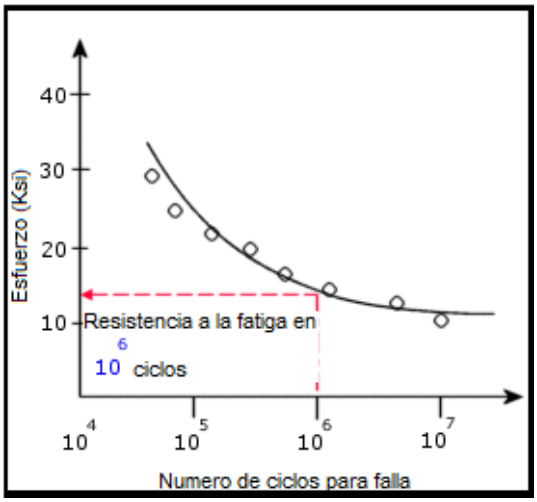


Figura 3.2.- Curvas de esfuerzo vs número de ciclos S-N o curva de Wohler (manual de TF de la compañía Petrotec 2012).

La falla por fatiga es resultante de la aplicación y remoción continua de una carga y puede suceder en elevado o reducido número de ciclos. Cuando el número de carga necesario para causar daño por fatiga es menor que 104 ciclos, la fatiga es denominada de bajo ciclo.

Cuando el número de ciclos supera esta franja, la fatiga se denomina de alto ciclo.

En el estudio de la fatiga de alto ciclo, se utiliza la curva S-N del material, o curva de Wohler como también es conocida, que correlaciona la amplitud de tensión que es la mitad de la diferencia algebraica entre las tensiones máximas y mínima, con número de ciclos asociado a la falla.

En la fatiga de bajo ciclo, situación en que el material puede soportar elevadas deformaciones, en general superiores aquellas asociadas al régimen elástico, se correlaciona la amplitud de la deformación con el número de ciclos a través de la curva ε-N.

El número de ciclos que define la vida total de un componente sometido a cargas cíclicas es la combinación entre el número de ciclos necesario a la iniciación de la grieta y lo que corresponde a su propagación hasta la falla final.

En algunos casos, donde hay concentraciones de tensión o defectos de superficie, el tiempo de iniciación es muy corto y la grieta es formada apenas en el comienzo de la vida total, en tanto que en materiales cuidadosamente terminados y libres de defectos, el tiempo de iniciación puede llegar al 80% de su vida útil.

La fatiga puede ser causada por cualquier carga que varíe con el tiempo. Los cargamentos de fatiga son de amplitud constante y de amplitud variable.

La fatiga bajo amplitud de carga constante generalmente ocurre en piezas de máquinas rotativas, tales como ejes y engranajes, en el caso de la TF está ocurre al doblarse y enderezarse dentro y fuera del carrete o cuello de ganso.

Por otra parte, las ondas de los navíos, la vibración en las alas de las aeronaves, el tráfico en puentes, son ejemplos de cargas variables en amplitud y frecuencia.

Amplitud constante: en este tipo de carga, la amplitud es constante durante toda la vida útil del material.

La tensión está representada por las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{\text{medio}} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}, \tag{3.35}$$

$$\sigma_{a} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}, \tag{3.36}$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}, \tag{3.37}$$

donde:

$\sigma m = Tensión\ media$

$\sigma max = Tensión\ máxima$

$\sigma min = Tensión\ mínima$

$\sigma a = Amplitud\ de\ tensión$

$R = Razón\ de\ tensiones$

El parámetro R indica el tipo de carga a la cual el elemento está sujeto. Si el ciclo varía de carga nula hacia carga de tracción, la solicitud es repetida y R = 0. En caso que ocurra la completa inversión de tracción para comprensión, la tensión media es nula, R = -1 y la carga es denominada totalmente reversa. Si hubiera solamente carga de tracción, la solicitud es fluctuante y R > 0.

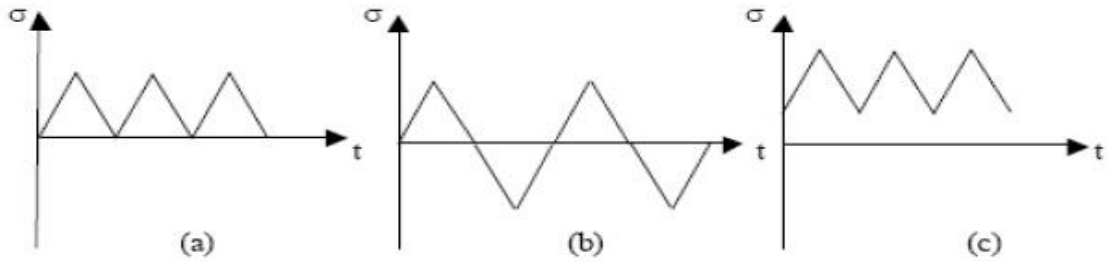


Figura 3.3.- Tipos de carga: (a) Repetida, (b) Totalmente reversa, (c) Fluctuante. (Manual de TF de la compañía Petrotec 2012)

Amplitud Variable: En la mayor parte de los casos prácticos, la probabilidad de que suceda una misma amplitud de tensión durante la vida útil del elemento es bastante pequeña. El análisis de fatiga en materiales sometidos a cargas variables se vuelve un poco más complejo y los estudios en estos casos, son hechos simplificando la solicitud real, que pasa a ser representada por varias combinaciones de cargas constantes, conforme la siguiente figura.

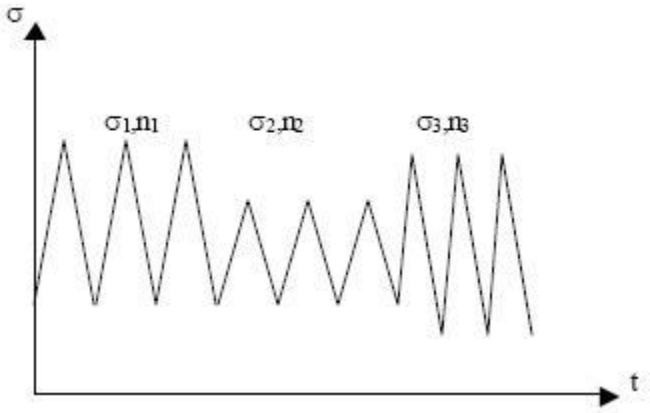


Figura 3.4.- Cargas en combinación (manual de TF de la compañía Petrotec 2012).

La contribución de cada uno de estos cargamentos constantes para la falla del material puede ser calculada por una teoría de daños acumulativos desarrollada por Miner y denominada regla del daño lineal.

3.5.- OPERACIONES DE MOLIENDA Y LIMPIEZA DE POZOS CON TUBERÍA FLEXIBLE.

La intervención de pozos petroleros con equipos convencionales, incrementa continuamente su costo. Esto ha derivado en la búsqueda de alternativas para lograr ahorros substanciales con equipos más versátiles, por lo cual, se originó la necesidad de desarrollar tecnologías que permitan, transportar, instalar e intervenir los pozos con mayor eficiencia y seguridad; como lo es el equipo de tubería flexible.

Durante la molienda de empacadores es importante que se tenga en circulación el fluido utilizado, al igual que se deben de contemplar los parámetros operativos de forma apropiada, en función del tipo de molino, dureza y características del pozo y tipo de empacador.

La remoción de los asentamientos orgánicos e inorgánicos, que se generan en la vida productiva de un pozo, son eliminados mediante el uso de molinos o trompos difusores de fluido, y demás herramientas de fondo que generan ondas vibrantes en el fluido a través de la TF. La razón principal de una limpieza es restablecer la capacidad de flujo del pozo.

Los asentamientos de partículas se dividen en tres categorías:

- Partículas muy finas.
- Partículas no consolidadas.
- Partículas consolidadas.

Métodos de remoción:

- Mecánicos.
- Químicos.
- A chorro Jet.

El equipo TF es el medio apropiado para la remoción de asentamientos en los pozos, debido a la habilidad de circular fluidos a través del interior de ésta mientras se va penetrando en el material con el impacto hidráulico requerido. Las partículas del asentamiento son incorporadas al flujo del fluido y transportadas a la superficie a través del espacio anular entre la TF y las tuberías del pozo. Un aspecto importante es que la velocidad anular del fluido debe ser mayor a la velocidad de asentamiento de las partículas.

Existen gran variedad de herramientas de molienda, clasificadas en dos tipos: las revestidas, con pastillas de carbono de tungsteno (metal muncher), o bien con carburo de tungsteno.

Actualmente en las operaciones de molienda se emplean molinos revestidos con metal Muncher, a continuación se mencionarán los diferentes tipos de molinos:

- Bladed Mill
- Step Mill
- Junk Mill
- Plano
- Zapatas lavadoras
- Molinos ampliadores

Todas las herramientas de molienda son integradas a las sartas de trabajo en el extremo inferior del motor de fondo y en ocasiones después de la canasta colectora, éstas permiten la circulación a través de ellas.

Motores de fondo

Son herramientas hidráulicas que sirven para proporcionar rotación, velocidad y torque a la barrena o molino durante la perforación o limpieza de un pozo. 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.

Trompos difusores

Utilizados en el extremo de la sarta de TF, son de simple diseño y construcción, la posición y diámetro de la boquilla o puertos, se definen por la acción de jet requerido para una específica aplicación de operación.

Trompo tipo jet

Están diseñados para realizar una de las siguientes funciones:

- Jet con orificios hacia abajo, utilizados generalmente para lavado de pozos.
- Jet con orificios laterales, utilizados para limpiar las paredes del pozo y, para colocar tapones de cemento.
- Jet para crear turbulencia, útiles para la remoción y dispersión de sólidos.
- Jet tipo combinado, para realizar cualquier tipo de trabajo y cambia la dirección de flujo por medio de una canica.

Tratamientos químicos

Son efectivos, únicamente cuando los depósitos son solubles en fluidos como solventes y formulaciones ácidas, el impacto creado por la acción de chorro de los fluidos a la salida de la tubería disuelve los depósitos presentes.

Tratamientos mecánicos

Se utilizan herramientas como molinos, barrenas y herramientas de impacto, para remover los materiales que presentan mayor resistencia a los métodos de limpieza.

CAPITULO 4

VALIDACIÓN

4.1.- COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA CALCULAR LOS LIMITES ELÁSTICOS Y PLÁSTICOS DE LA TUBERÍA FLEXIBLE.

A continuación un programa operativo real de la compañía Petrotec

SERVICIOS DE TUBERÍA FLEXIBLE
DISTRITO VILLAHERMOSA

PEMEX
EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN

Activo Integral: SAMARIA-LUNA
Unidad Operativa:

Pozo: Pemex 1
Profundidad de Interés: 867 m.

Calibrar y Abrir Camisa con Herramienta Especial.

ATENCIÓN: Ing. Pemex

Pemex Exploración - Producción
Intervenciones sin equipo
División Sur.

De acuerdo a su solicitud expresa, sírvanse encontrar adjunto la propuesta operativa de Tubería Flexible para efectuar la calibración y apertura de camisa de circulación con herramienta especial, operación próxima a efectuarse en el pozo **Pemex 1.**

Esta propuesta se elaboró con los datos proporcionados por su digno cargo y en base a los resultados de nuestro simulador Cerberus 11.5, Servicios Petrotec.
El software analiza:

ELONGACIÓN DE LA TF. VS PROFUNDIDAD

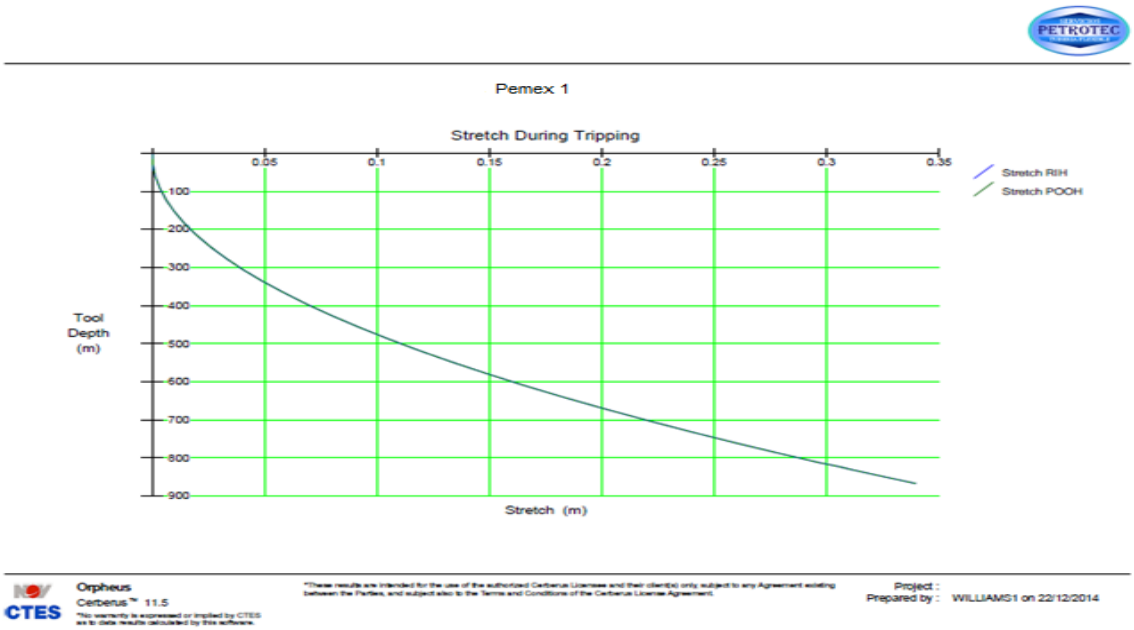


Figura 4.1.- (software Cerberus-NOV CTES versión 2012)

LÍMITES DE LA TUBERÍA FLEXIBLE

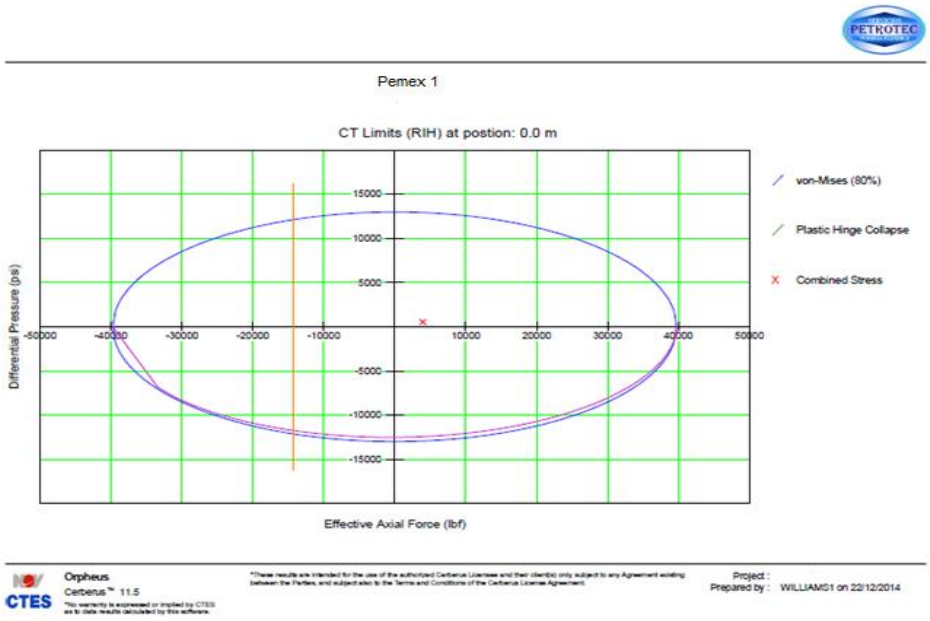


Figura 4.2.-Representacion grafica de los límites de la tubería flexible (software Cerberus-NOV CTES versión 2012)

A continuación comparación de resultados con el modelo matemático propuesto

DEFORMACIÓN DE LA TF CON RESPECTO A LA PROFUNDIDAD

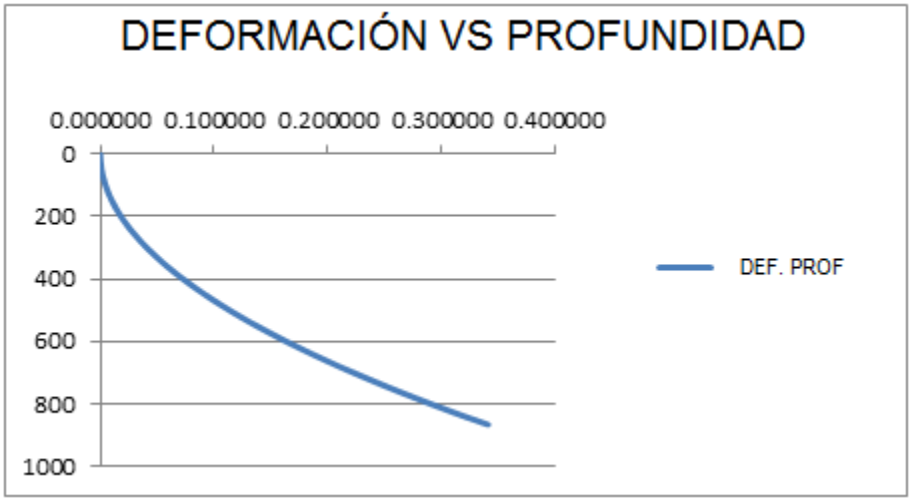


Figura 4.3.-Deformación de TF respecto a la profundidad.

La deformación (elongación) esperada a la profundidad programada de **867 m**. es de **0.34 m**. al descenso y **0.34 m** al ascenso de la tubería dentro del pozo.

LÍMITES ELASTICOS EN LA TUBERÍA FLEXIBLE

Tabla 4.1.- Limites elasticos de la TF de acuerdo a los esfuerzos presentes

Prof (m)	Prof (pulg)	Fe (w x L) (lb)	Pi (psi)	Po (psi)	diferencial P (psi)	Fa (lb)	σ a (lbf)	σ r (lbf)	σ h (lbf)
1	39.38	5.7	201.422	100.1	-101.322	100	251	-646	653
11	433.18	62.7	215.642	101.1	-114.542	175	552	-692	750
21	826.98	119.7	229.862	102.1	-127.762	249	853	-737	847
31	1220.78	176.7	244.082	103.1	-140.982	323	1154	-783	944
41	1614.58	233.7	258.302	104.1	-154.202	398	1454	-828	1041
51	2008.38	290.7	272.522	105.1	-167.422	472	1755	-874	1139
61	2402.18	347.7	286.742	106.1	-180.642	547	2056	-920	1236
631	24848.8	3596.7	1097.282	163.1	-934.182	4787	19196	-3519	6777
641	25242.6	3653.7	1111.502	164.1	-947.402	4862	19497	-3565	6874
651	25636.4	3710.7	1125.722	165.1	-960.622	4936	19798	-3610	6971
661	26030.2	3767.7	1139.942	166.1	-973.842	5011	20098	-3656	7068
771	30362	4394.7	1296.362	177.1	-1119.262	5829	23406	-4157	8137
781	30755.8	4451.7	1310.582	178.1	-1132.482	5903	23707	-4203	8235
791	31149.6	4508.7	1324.802	179.1	-1145.702	5978	24008	-4249	8332
801	31543.4	4565.7	1339.022	180.1	-1158.922	6052	24308	-4294	8429
811	31937.2	4622.7	1353.242	181.1	-1172.142	6127	24609	-4340	8526
821	32331	4679.7	1367.462	182.1	-1185.362	6201	24910	-4385	8623
831	32724.8	4736.7	1381.682	183.1	-1198.582	6275	25211	-4431	8721
841	33118.6	4793.7	1395.902	184.1	-1211.802	6350	25511	-4477	8818
851	33512.4	4850.7	1410.122	185.1	-1225.022	6424	25812	-4522	8915
867	34142.5	4941.9	1432.874	186.7	-1246.174	6543	26293	-4595	9071
861	33906.2	4907.7	1424.342	186.1	-1238.242	6499	26113	-4568	9012
871	34300	4964.7	1438.562	187.1	-1251.462	6573	26413	-4613	9109

Como se puede observar en la tabla los parametros del ensayo no superan la propiedad de doformacion de la tuberia que esta dada por el modulo de young, por lo tanto para este caso los parametros estan dentro de los limites elasticos de la tubería.

Tabla 4.2.- Deformación total y deformación unitaria en la TF que se estudio.

Von Mises (lbf)	Von Mises al 80%	yp	Deformación(δ)	Deformación (cm)	Deformación unitaria (ε)
1064.032492	851.2	570.1	0.000000	4.53109E-05	1.60116E-05
1139.029998	911.2	673.1	0.000055	0.00548262	1.7142E-05
1235.51699	988.4	850.0	0.000200	0.019982111	1.82724E-05
1348.889852	1079.1	1064.5	0.000435	0.043543784	1.94028E-05
1475.260701	1180.2	1298.1	0.000762	0.076167639	2.05332E-05
1611.574741	1289.3	1542.2	0.001179	0.117853677	2.16635E-05
1755.517262	1404.4	1792.4	0.001686	0.168601896	2.27939E-05
1905.360142	1524.3	2046.6	0.002284	0.228412297	2.39243E-05
2059.816106	1647.9	2303.4	0.002973	0.29728488	2.50547E-05
2217.921598	1774.3	2562.1	0.003752	0.375219645	2.61851E-05
2378.949083	1903.2	2822.0	0.004622	0.462216592	2.73155E-05
2542.343401	2033.9	3083.0	0.005583	0.558275721	2.84459E-05
2707.676108	2166.1	3344.7	0.006634	0.663397031	2.95763E-05
2874.612764	2299.7	3607.0	0.007776	0.777580524	3.07066E-05
3042.889397	2434.3	3869.8	0.009008	0.900826199	3.1837E-05
3212.29543	2569.8	4133.0	0.010331	1.033134056	3.29674E-05
3382.661183	2706.1	4396.5	0.011745	1.174504095	3.40978E-05
3553.848637	2843.1	4660.3	0.013249	1.324936316	3.52282E-05
3725.744528	2980.6	4924.2	0.014844	1.484430718	3.63586E-05
3898.255142	3118.6	5188.4	0.016530	1.652987303	3.7489E-05
4071.302336	3257.0	5452.7	0.018306	1.83060607	3.86194E-05
4244.820489	3395.9	5717.2	0.020173	2.017287018	3.97498E-05
4418.754118	3535.0	5981.7	0.022130	2.213030149	4.08801E-05
18506.21814	14805.0	20581.6	0.269347	26.93466257	0.000103051
18799.97418	15040.0	20847.3	0.276379	27.6378879	0.000104182
19093.97003	15275.2	21113.0	0.283502	28.3501754	0.000105312
19388.19478	15510.6	21378.7	0.290715	29.07152508	0.000106443
19682.63816	15746.1	21644.4	0.298019	29.80193695	0.000107573
19977.29051	15981.8	21910.1	0.305414	30.541411	0.000108703
20272.14272	16217.7	22175.8	0.312899	31.28994723	0.000109834
20567.18618	16453.7	22441.6	0.320475	32.04754564	0.000110964
20862.41279	16689.9	22707.3	0.328142	32.81420624	0.000112095
21247.96459	16998.4	23132.4	0.340597	34.05971253	0.000113903
21303.75077	17043.0	22973.0	0.335899	33.58992902	0.000113225
21599.7348	17279.8	23238.7	0.343747	34.37471397	0.000114355

Como se puede observar en la tabla los parámetros de deformación no son considerables ya que al estar dentro de los límites elásticos, al ser retirada la fuerza o carga de tensión la tubería regresara a su longitud original.

Tabla 4.3.- Cambios en el diámetro, espesor de pared y ovalidad

cambio en el diametro (Δ_t)	cambio en el espesor de pared	Ovalidad
5.44395E-06	5.17175E-07	0.126666667
5.82828E-06	5.53686E-07	0.126666667
6.21261E-06	5.90198E-07	0.126666667
6.59694E-06	6.26709E-07	0.126666667
6.98127E-06	6.63221E-07	0.126666667
7.3656E-06	6.99732E-07	0.126666667
7.74994E-06	7.36244E-07	0.126666667
2.96569E-05	2.8174E-06	0.126666667
3.50375E-05	3.32856E-06	0.126666667
3.54218E-05	3.36507E-06	0.126666667
3.58062E-05	3.40159E-06	0.126666667
3.61905E-05	3.4381E-06	0.126666667
3.65748E-05	3.47461E-06	0.126666667
3.69592E-05	3.51112E-06	0.126666667
3.73435E-05	3.54763E-06	0.126666667
3.77278E-05	3.58414E-06	0.126666667
3.81122E-05	3.62065E-06	0.126666667
3.87271E-05	3.67907E-06	0.126666667
3.84965E-05	3.65717E-06	0.126666667
3.88808E-05	3.69368E-06	0.126666667

Como se observa en la tabla los parámetros obtenidos no son relevantes para determinar un cambio de tubería por considerarse una tubería ovalada.

APLICANDO EL CRITERIO DE VON- MISES

Tabla 4.4 aplicando el criterio de Von mises al 80%

Von Mises (lbf)	Von Mises al 80%
433.9704665	347.2
400.3556995	320.3
423.587252	338.9
495.7366111	396.6
599.3918324	479.5
721.0918828	576.9
853.1492201	682.5
991.4337264	793.1
15037.35654	12029.9
15274.0288	12219.2
15511.02741	12408.8
15748.33764	12598.7
16053.58924	12842.9
16112.07947	12889.7
16350.66577	13080.5

Como se puede ver en la tabla podemos estar seguros que estamos dentro de los límites elásticos de acuerdo al criterio de falla de Von Mises

CAMBIO EN EL DIÁMETRO Y EN EL ESPESOR DE LA TUBERÍA FLEFLIBLE

Tabla.- 4.5 Cambios en el diámetro y espesor de pared respecto a la profindidad.

Prof (m)	cambio en el diametro (Δ_t)	cambio en el espesor de pared	Prof (m)	cambio en el diametro (Δ_t)	cambio en el espesor de pared	Prof (m)	cambio en el diametro (Δ_t)	cambio en el espesor de pared	Prof (m)	cambio en el diametro (Δ_t)	cambio en el espesor de pared
1	5.44395E-06	5.17175E-07	221	1.38992E-05	1.32043E-06	441	2.23545E-05	2.12368E-06	661	3.08099E-05	2.92694E-06
11	5.82828E-06	5.53686E-07	231	1.42836E-05	1.35694E-06	451	2.27389E-05	2.16019E-06	671	3.11942E-05	2.96345E-06
21	6.21261E-06	5.90198E-07	241	1.46679E-05	1.39345E-06	461	2.31232E-05	2.19671E-06	681	3.15785E-05	2.99996E-06
31	6.59694E-06	6.26709E-07	251	1.50522E-05	1.42996E-06	471	2.35075E-05	2.23322E-06	691	3.19628E-05	3.03647E-06
41	6.98127E-06	6.63221E-07	261	1.54366E-05	1.46647E-06	481	2.38919E-05	2.26973E-06	701	3.23472E-05	3.07298E-06
51	7.3656E-06	6.99732E-07	271	1.58209E-05	1.50299E-06	491	2.42762E-05	2.30624E-06	711	3.27315E-05	3.10949E-06
61	7.74994E-06	7.36244E-07	281	1.62052E-05	1.5395E-06	501	2.46605E-05	2.34275E-06	721	3.31158E-05	3.14601E-06
71	8.13427E-06	7.72756E-07	291	1.65896E-05	1.57601E-06	511	2.50449E-05	2.37926E-06	731	3.35002E-05	3.18252E-06
81	8.5186E-06	8.09267E-07	301	1.69739E-05	1.61252E-06	521	2.54292E-05	2.41577E-06	741	3.38845E-05	3.21903E-06
91	8.90293E-06	8.45779E-07	311	1.73582E-05	1.64903E-06	531	2.58135E-05	2.45229E-06	751	3.42688E-05	3.25554E-06
101	9.28726E-06	8.8229E-07	321	1.77426E-05	1.68554E-06	541	2.61979E-05	2.4888E-06	761	3.46532E-05	3.29205E-06
111	9.6716E-06	9.18802E-07	331	1.81269E-05	1.72206E-06	551	2.65822E-05	2.52531E-06	771	3.50375E-05	3.32856E-06
121	1.00559E-05	9.55313E-07	341	1.85112E-05	1.75857E-06	561	2.69665E-05	2.56182E-06	781	3.54218E-05	3.36507E-06
131	1.04403E-05	9.91825E-07	351	1.88956E-05	1.79508E-06	571	2.73509E-05	2.59833E-06	791	3.58062E-05	3.40159E-06
141	1.08246E-05	1.02834E-06	361	1.92799E-05	1.83159E-06	581	2.77352E-05	2.63484E-06	801	3.61905E-05	3.4381E-06
151	1.12089E-05	1.06485E-06	371	1.96642E-05	1.8681E-06	591	2.81195E-05	2.67136E-06	811	3.65748E-05	3.47461E-06
161	1.15933E-05	1.10136E-06	381	2.00486E-05	1.90461E-06	601	2.85039E-05	2.70787E-06	821	3.69592E-05	3.51112E-06
171	1.19776E-05	1.13787E-06	391	2.04329E-05	1.94112E-06	611	2.88882E-05	2.74438E-06	831	3.73435E-05	3.54763E-06
181	1.23619E-05	1.17438E-06	401	2.08172E-05	1.97764E-06	621	2.92725E-05	2.78089E-06	841	3.77278E-05	3.58414E-06
191	1.27463E-05	1.21089E-06	411	2.12016E-05	2.01415E-06	631	2.96569E-05	2.8174E-06	851	3.81122E-05	3.62065E-06
201	1.31306E-05	1.24741E-06	421	2.15859E-05	2.05066E-06	641	3.00412E-05	2.85391E-06	867	3.87271E-05	3.67907E-06
211	1.35149E-05	1.28392E-06	431	2.19702E-05	2.08717E-06	651	3.04255E-05	2.89042E-06	861	3.84965E-05	3.65717E-06

Como se puede ver en la tabla los cambios de diámetro y cambios de espesor de pared son prácticamente nulos por lo que se determina no continuar con trabajando con la misma tubería.

4.2.- SIMULACIÓN PARA UN TRAMO DE TUBERÍA FLEXIBLE USANDO EL SOFTWARE "SOLID WORKS" VERSIÓN 2014. (Desarrollado en el apéndice A)

Elongación de un tramo de once metros de TF tipo Q-1000 usando el software "SOLID WORKS" versión 2014.

ANALIZAR LIMITE ELÁSTICO Y DEFORMACIÓN

Datos de la tubería simulada

E = 30 000 000 psi

Poisson = 0.23

Cedencia = 90 000 psi

Longitud inicial = 11metros

Longitud final = 11.023metros

Diámetro exterior = 1.5 pulgadas

Diámetro interior = 1.310 pulgadas

Esfuerzo axial por propio peso = 30 000 lbf

Presión interna aplicada por flujo interior de nitrógeno (con Q= 15m3/min) =1800 psi

Presión de pozo = 300 psi (21kg/cm2)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Deformación vs profundidad

Para consideraciones de diseño de sarta con una tubería flexible tipo Q-900 de 1.5" de diámetro y a una profundidad programada para la operación de apertura de camisa a 867m y sabiendo que la tubería está sometida a un esfuerzo axial tensor, existe una elongación esperada de 34cm. Aplicando la fórmula de porcentaje de deformación sería entonces 0.039% de elongación poco considerable para reducción de espesor de pared.

Limites elásticos en la tubería flexible

De acuerdo a la operación en el pozo pemex 1 el cual esta siendo sujeto de estudio, y de acuerdo a los datos de presion de cabeza y diametros de tubería de producción, obtuvimos los esfuerzos axiales radiales y circunferencialesa asi como deformación de la tubería y los cambios en el diámetro, en cuanto a que la tubería esta estacionada a esa profundidad sin tomar en cuenta con los esfuerzos de doblamiento y enderazmiento a los que va a ser sujeta la tubería en esta operación; se considera que la para esta operación la los parametros obtenidos demustran que los valores calculados estan por debajo del punto de cedencia.

Aplicación del criterio de falla de Von mises

Con valores como 347.2 lbf hasta 12,842 lbf aplicadas en la tubería a tensión, tenemos la certeza de que estamos dentro de los limites elásticos de la tubería estamos en tensión pero sin riesgo de estallamiento ni colapso para un tramo de tubería de 827m. como la del caso de estudio.

La elongacion de 34 cm. sera recuperada al momento de recuperar TF en superficie por no sobrepasar el limite elástico.

Cambio en el diámetro y el espesor de pared de la tubería flexible.

De acuerdo a la tabla anterior podemos obserbar un cambio en el diámetro y en espesor de pared lo cual hace mas suceptible a la fatiga a cualquier tubería flexible, en este caso el cambio de diámetro y de espesor de pared es casi nulo ya que a 867m las variaciones en el diámetro y en el espesor de pared son de 0.00003mm. y 0.000003mm. respectivamente.

Caso contrario seria una tubería sometida a esfuerzos axiales, radiales y circunferenciales mayores a los del caso de estudio como por ejemplo bajar a limpiar un puncher o limpiar todo el aparejo a profundiades hasta 6000m. o mas con bombeo de solventes y ácidos a presiones internas mayores a las del caso de estudio, es muy probable que tengamos cambios significativos en el diámetro y espesor lo que hace a la tubería mas suceptible a micro-grietas y su propagación y posteriormente el fallo del material.

Recomendaciones

Identificar las secciones mayormente fatigadas; eliminar de 20 a 50 pies eliminando la fatiga acumulada, evaluar el espesor de pared realizando cálculos para cambio en espesor, realizar un historial de eventos de doblamiento.

Para la perforación horizontal con TF es muy importante al momento de seleccionar los fluidos de perforación, seleccionar un fluido que provoque menos caídas de presión por fricción. Cuando los fluidos pasan a través de conductos muy estrechos, o como es el caso de la tubería flexible, para reducir estos efectos es necesario el uso de fluidos adelgazantes o programas de bombeo con poco gasto para evitar derrumbes en las paredes del pozo por la turbulencia del flujo.

Algunos factores que se deben considerar en el diseño de trabajos con tubería flexible, es tomar en cuenta tanto los esfuerzos mecánicos a los que va a someterse, como los efectos del elemento contenido sobre el material constitutivo de las paredes; estas pueden ser corrosión, abrasión, incrustaciones, etc.

En cuanto a los espesores de pared estas pueden variar de acuerdo a las operaciones que se vayan a realizar con la TF tomándose en cuenta presiones internas y externas esperadas a las que va a ser sometida, estos pueden ser de pared delgada y de pared gruesa de acuerdo a la mecánica de recipientes cilíndricos a presión considerándose de pared delgada cuando el cociente entre el espesor de pared y el diámetro interno, es igual o menor a 0.10 y de pared gruesa si es igual o mayor a 0.10 decir si $\frac{t}{d_i} \leq 0.10$ o bien $\frac{t}{d_i} \geq 0.10$ estas ecuaciones son expresiones para determinar recipientes de pared delgada o gruesa respectivamente.

Tomando en cuenta que para esperadas presiones altas o pozos profundos con altas presiones y temperaturas, es obvio que se debe de considerar optar por tubería configurada con espesores de pared gruesa es decir simplemente con espesores mayores a 0.125”

El uso de los diagramas “Esfuerzo – Deformación” como el mostrado en el marco teórico.

De acuerdo a la representación gráfica el límite elástico de los materiales isotrópicos y homogéneos es de suma importancia para el diseño, ya que el rebasar este valor conduciría a una deformación plástica, con pérdida de tolerancia.

También a partir de dicho diagrama se pueden obtener las siguientes propiedades:

- Limite elástico.- Es el mayor esfuerzo para el cual puede aplicarse la ley de Hooke. En otras palabras, es el esfuerzo en el extremo de la sección recta de la curva llamada esfuerzo – deformación.

- Resistencia máxima.- Es el mayor esfuerzo, basado en la sección original, que puede soportar el material. También conocida como resistencia última.

- Resistencia a la ruptura.- Es el esfuerzo al que se somete el material basado en la sección transversal original en el instante en el que se rompe. También conocido como resistencia a la fractura.

- Resistencia a la Cedencia.- también llamado punto de Cedencia es donde el material comienza a deformarse

- Deformación plástica.- Esto ocurre en el instante que un material rebaso su límite elástico y su resistencia a la cedencia, el material quedará deformado a un después de retirar la fuerza o carga que le fue aplicada.

- Porcentaje de alargamiento.- Se obtiene comparando el alargamiento total en la fractura, con la longitud calibrada de la muestra. Las dos partes de la fractura se acoplan adecuadamente, y se mide la distancia entre las marcas de comparación; el alargamiento total esta distancia menos la longitud inicial.

APÉNDICE A

SIMULACIÓN DE APLICACIÓN DE ESFUERZOS A UN TRAMO DE TF Q-1000

a) Elongación de un tramo de once metros de TF tipo Q-1000 usando el software "SOLID WORKS" versión 2014.

E = 30 000 000 psi

Poisson = 0.23

Cedencia = 90 000 psi

Longitud inicial = 11metros

Diámetro exterior = 1.5 pulgadas

Diámetro interior = 1.310 pulgadas

Esfuerzo axial por propio peso = 30 000 lbf

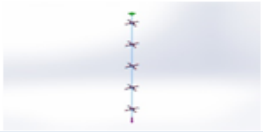
Presión interna aplicada por flujo interior de nitrógeno (con Q= 15m3/min) =1800 psi

Presión de pozo = 300 psi (21kg/cm2)

Información de modelo

Nombre del modelo: Pieza4
Configuración actual: Predeterminado

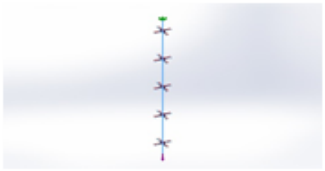
Sólidos

Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Saliente-Extruir1 	Sólido	Masa:23.3604 kg Volumen:0.00297584 m^3 Densidad:7850 kg/m^3 Peso:228.932 N	

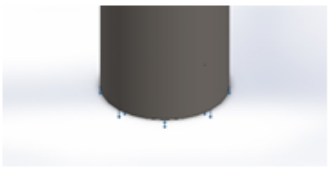
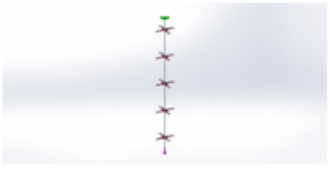
Unidades

Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/m^2

Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: Acero tipo TF Q-1000 Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión máxima von Mises Límite elástico: 2.5e+008 N/m^2 Límite de tracción: 4e+008 N/m^2 Módulo elástico: 2e+011 N/m^2 Coeficiente de Poisson: 0.26 Densidad: 7850 kg/m^3 Módulo cortante: 7.93e+010 N/m^2	Sólido 1
Datos de curva:N/A		

Cargas y sujeciones

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza axial Valor: 30000 lbf Angulo de fase: 0 Unidades: deg
Presión-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Normal a cara seleccionada Valor: 2000 Unidades: psi Angulo de fase: 0 Unidades: deg
Presión-2		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Normal a cara seleccionada Valor: 300 Unidades: psi Angulo de fase: 0 Unidades: deg

Fuerzas resultantes

Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N	-31.0229	12957	-81.9861	12957

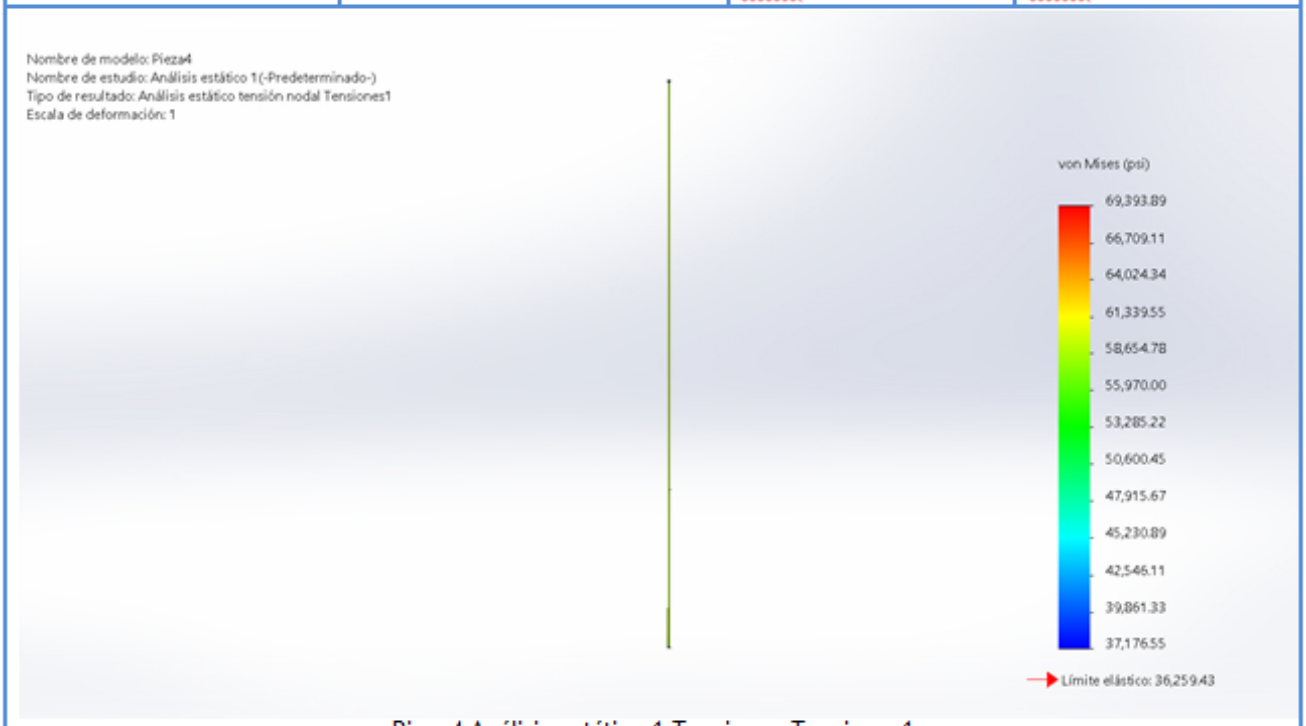
Fuerzas resultantes

Momentos de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	0

Resultados del estudio

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	3717.6.6 psi Nodo: 61056	69393.9 psi Nodo: 2815



Pieza4-Análisis estático 1-Tensiones-Tensiones1

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES: Desplazamiento resultante	0 mm Nodo: 1	23.5988 mm Nodo: 6327

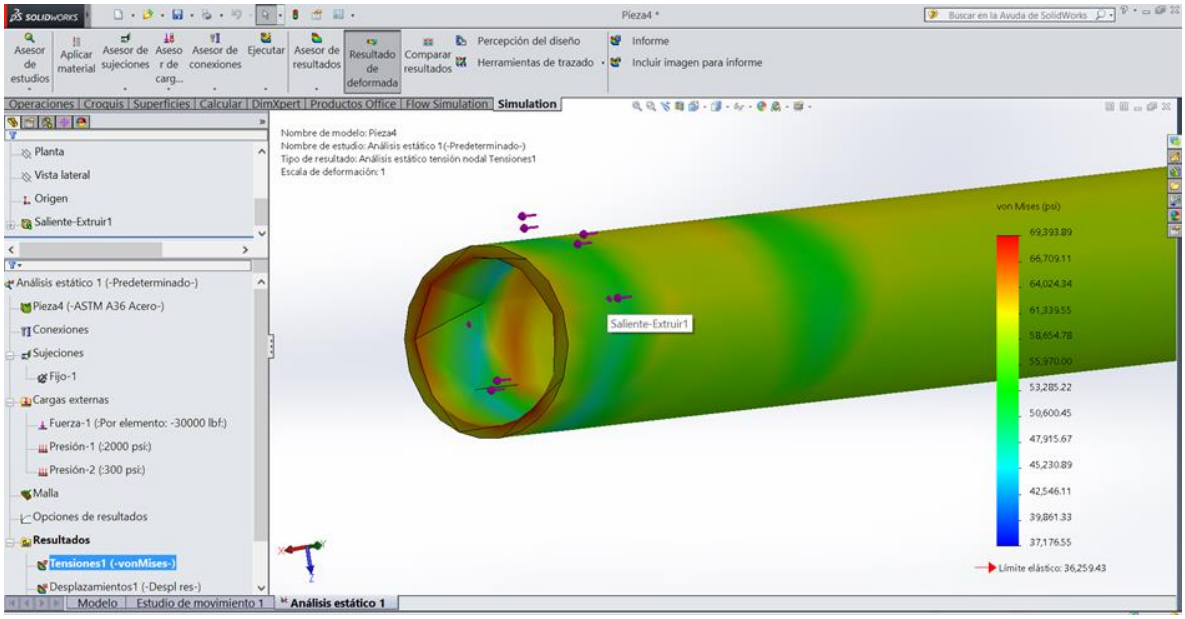


Figura4.4.-Cara fracturad de la punta del tramo de la tubería simulado

Como se puede apreciar en las pantallas del programa al aplicar presión interna, externa y someter la tubería a un esfuerzo axial se incrementó la longitud en 23.5mm, se observa rebasar su límite elástico que es de 36,259.43 psi alcanzando en la zona rojiza 69,393.89 psi aplicando la fórmula de % de elongación tenemos:

$$\% \varepsilon = \frac{Lf - L}{L} \; x \; 100 \qquad \% \varepsilon = \frac{11.0235 - 11}{11} \; x \; 100 = \; 0.23\%$$

Por lo tanto existe una deformación unitaria de .23% por cada 11m, además ocurre una fractura en la punta de la tubería por lo que se recomienda manejar menos de 1800 psi de presión interna

Cabe considerar que solo son 11m los que se simularon las unidades de tubería flexibles llegar a tener hasta 8000m en carrete.

APÉNDICE B

SIMULACIÓN DE APLICACIÓN DE ESFUERZOS A UN TRAMO DE TF Q-900

b) Elongación de un tramo de once metros de TF tipo Q-900 usando el software "SOLID WORKS" versión 2014.

ANALIZAR LIMITE ELÁSTICO Y ELONGACIÓN

Datos de la tubería simulada

E = 30 000 000 psi

Poisson = 0.23

Cedencia = 90 000 psi

Longitud inicial = 11metros

Longitud final = 11.24metros

Diámetro exterior = 1.5 pulgadas

Diámetro interior = 1.310 pulgadas

Esfuerzo axial por propio peso = 30 000 lbf

Presión interna aplicada por flujo interior de nitrógeno (con Q= 15m3/min) =1800 psi

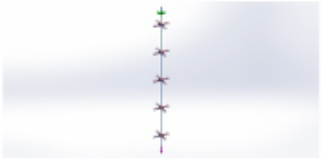
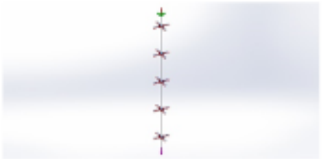
Presión de pozo = 300 psi (21kg/cm2)

Información de modelo

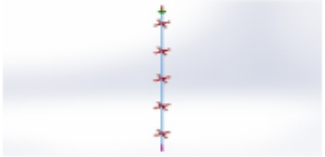
Nombre del modelo: Pieza5
Configuración actual: Predeterminado

Sólidos

Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Saliente-Extruir1	Sólido	Masa:2.79558 kg Volumen:0.00274076 m^3 Densidad:1020 kg/m^3 Peso:27.3967 N	

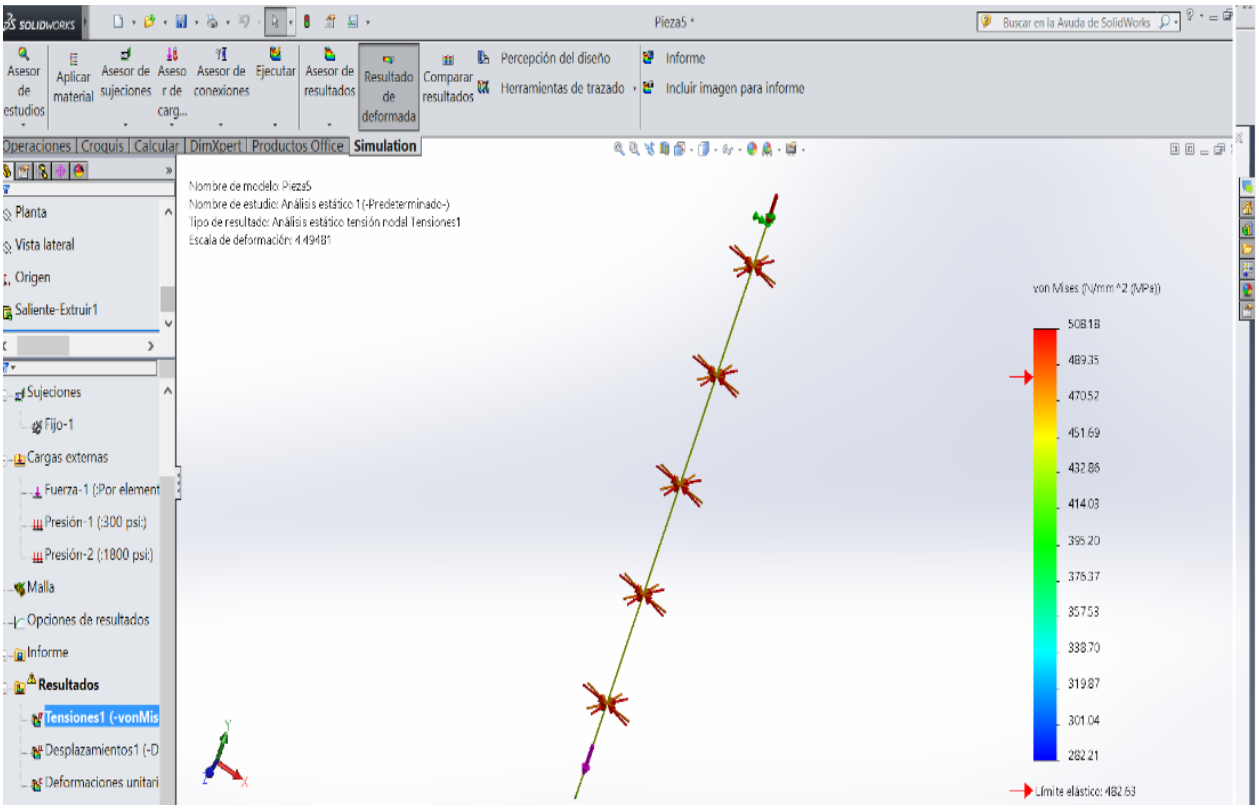
Presión-1		Entidades: 2 cara(s) Tipo: Normal a cara seleccionada Valor: 300 Unidades: psi Ángulo de fase: 0 Unidades: deg
Presión-2		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Normal a cara seleccionada Valor: 1800 Unidades: psi Ángulo de fase: 0 Unidades: deg

Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: acero tipo tuberia flexible Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión máxima de von Mises Límite elástico: 4.82633e+008 N/m^2 Límite de tracción: 8.06687e+009 N/m^2 Módulo elástico: 2.06843e+010 N/m^2 Coeficiente de Poisson: 0.23 Densidad: 1020 kg/m^3 Módulo cortante: 3.189e+008 N/m^2	Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Pieza5)

Resultados del estudio

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	282.209 N/mm^2 (MPa) Nodo: 44101	508.185 N/mm^2 (MPa) Nodo: 2806



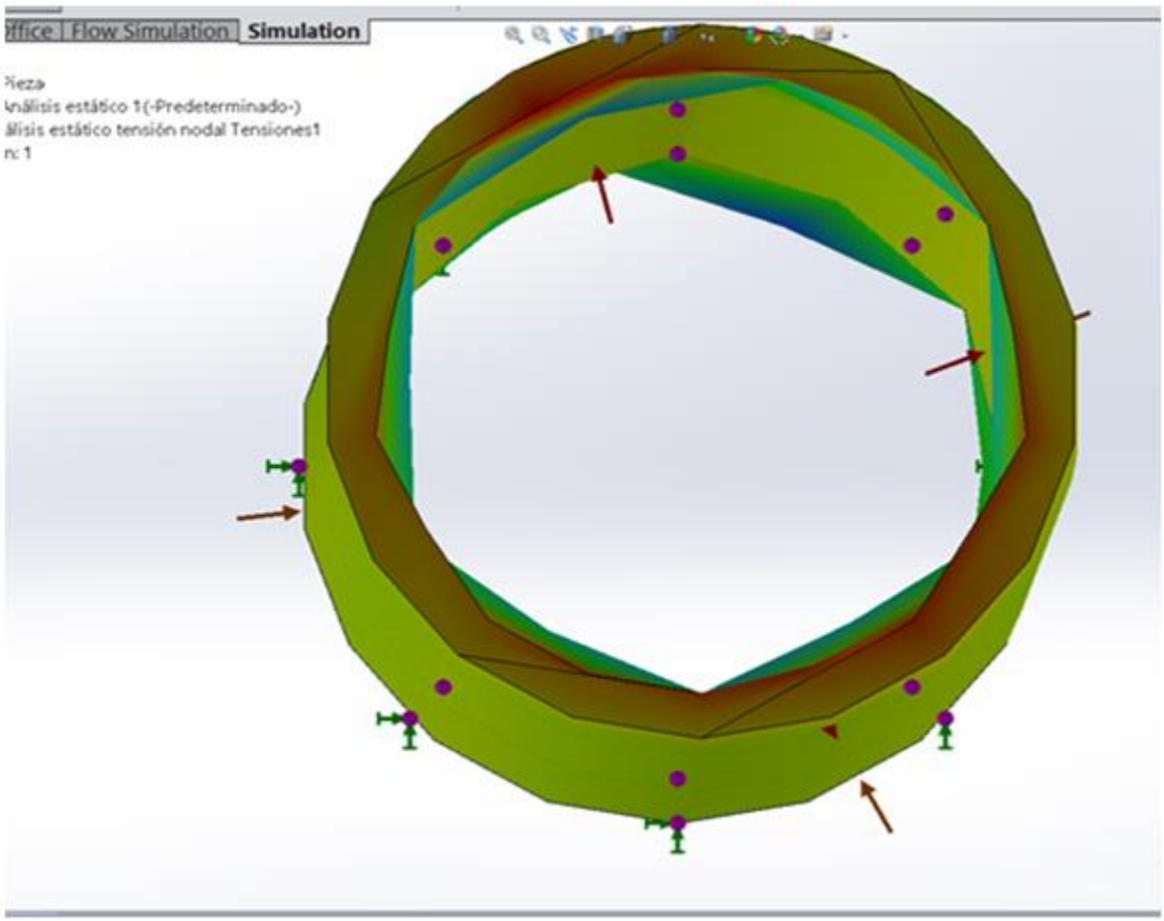


Figura4.5.-Cara de la punta de la tubería dañada y rota en la parte rojiza.

Como se puede apreciar en las pantallas del programa al aplicar presión interna, externa y someter la tubería a un esfuerzo axial se incrementó la longitud en 24cm, se observa rebasar su límite elástico que es de 482.63 Mpa alcanzando en la zona rojiza 508.18 Mpa aplicando la fórmula de % de elongación tenemos:

$$\% \varepsilon = \frac{Lf - L}{L} \; x \; 100 \qquad \% \varepsilon = \frac{11.24 - 11}{11} \; x \; 100 = \; 2.1\%$$

Por lo tanto existe una deformación unitaria de 2% por cada 11m, además ocurre una fractura en la punta de la tubería, por lo que se recomienda manejar menos de 1800 psi de presión interna.

APÉNDICE C

PROBLEMA EJEMPLO DE UNA TUBERÍA FLEXIBLE A LA QUE SE LE APLICA UNA FUERZA A TENSIÓN.

Se tiene una tubería flexible de un diámetro exterior (OD) = 1.5" y espesor (t) =0.087" estacionada a 10,000 ft (3,048m) se tensiona para levantar a superficie con una fuerza de 1000 lbf.

Determinar la deformación total, el esfuerzo normal correspondiente, la deformación unitaria, cambio en el diámetro y cambio en el espesor de pared

Datos

$E = 30\ x\ 10^6\ psi$

v = .35

$F = 1000\ lbf$

$L = 10{,}000\ ft\ o\ 120{,}000\ in$

$OD = 1.5"$

$t = 0.087"$

δ =?

ID =?

Ecuaciones

Obteniendo el área transversal:

$A = \frac{\pi}{4}((OD)^2 - (ID))^2$,

Como no sabemos el diámetro interior entonces:

$ID = OD - ((2)(t))$,

$ID = 1.5" - (2\ x\ 0.087") = 1.326\ pulgadas,$

Ahora:

$A = \frac{\pi}{4}((1.5)^2 - (1.326)^2) = 0.3862\ pulgadas^2,$

Aplicando la fórmula de la deformación tenemos:

$$\delta = \frac{P\ L}{A\ E} = \frac{\left((1000\ lbf)(120\ 000")\right)}{\left((.3862")(30\ x\ 10^6)\right)} = \frac{120{,}000{,}000}{11{,}586{,}000} = 10.35\ pulgadas,$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{1000lbf}{.3862"} = 2{,}589.331\ psi,$$

Deformación unitaria:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{10.35"}{120{,}000"} = 0.000086,$$

Obteniendo el porcentaje de deformación unitaria tenemos:

$$\%\ \varepsilon = \frac{120010.35 - 120000}{120000}\ x\ 100 = \ 0.0086\%,$$

El esfuerzo normal correspondiente aplicado a la tubería sería 2589.33 psi, por lo tanto la tubería sufrirá una elongación de 10.35 pulgadas (26.30cm) evento que reducirá su espesor haciéndola más susceptible a la fatiga.

El cambio en el diámetro está dado por:

$\delta\ lateral = \varepsilon\ .\mathrm{v}$

Sustituyendo

$\delta\ lateral = (0.000086)(0\ .35) = 0.0000301$

$\Delta d = (.0000301)(\ 1.5) = 0.0000415\ in = \ -0.0000415 in.$

El cambio del signo está dado por la acción de la tensión reduciendo el diámetro.

∴ El nuevo diámetro está dado por:

$1.5 - 0.0000415 = 1.499 in$

Para el cambio en el espesor de pared (t) tenemos:

$\Delta t = (t)(\delta lateral)$

Sustituyendo:

$\Delta t = (0.087)(0.0000301) = 0.0000027 in = -0.0000027 in,$

∴ el nuevo espesor de pared está dado por:

$0.087 - 0.0000027 = 0.0869 in$

La tubería en cuestión ha sido modificada de sus condiciones iniciales y para trabajos posteriores su resistencia a la fatiga es menor, si bien ahora es casi imperceptible el daño se acumula; por lo tanto realizando un análisis similar al anterior podemos predecir cuándo cambiar la tubería.

APÉNDICE D (NOTA)

PROGRAMA CERBERUS 11.5.

El software Cerberus 11.5 creado por Ken Newman, para realizar los cálculos de esfuerzos presentes en la tubería flexible utiliza las ecuaciones mencionadas en el artículo Tubing Limits for burts and collapse creado por el mismo en septiembre de 2002.

GLOSARIO

TF.- Tubería Flexible (CT Coiled Tubing por sus siglas en inglés).

PTF.- Perforación con tubería flexible.

Carrera de trabajo.- Significa un solo recorrido de la tubería flexible de entrada y salida del pozo, incluyendo un ciclo de plegado y otro de desplegado dentro y fuera del carrete y dos ciclos de flexión dentro y fuera del cuello de cisne.

Bucle.- Generalmente, un bucle se utiliza para realizar una acción repetida sin tener que escribir varias veces el mismo código, lo que ahorra tiempo, deja el código más claro y facilita su modificación en el futuro.

Un Ciclo.- En la tubería flexible es un desdoblamiento; esto quiere decir que son dos flexiones, una cuando se dobla y otra cuando se endereza. Es decir, es el efecto combinado de estar doblando y enderezando, con la presencia de presión interna.

Un viaje.- Es el número de doblamientos que sufre un tubo, uno cuando se endereza, cuando sale del carrete, uno cuando se dobla al entrar al cuello de ganso y otro cuando sale del cuello de ganso y entra en las cadenas del inyector. Este proceso se repite cuando se está sacando la tubería del pozo.

Materiales isotrópicos.- Un material es isotrópico si sus propiedades mecánicas y térmicas son las mismas en todas las direcciones

Materiales homogéneos.-Son aquellos que tienen la misma composición y las mismas propiedades elásticas en toda su estructura.

Metales dúctiles.- Son aquellos que bajo la acción de una fuerza o carga pueden llegar a deformarse considerablemente antes de romperse

Metales frágiles.- Se define como la capacidad de un material de fracturarse con escasa deformación

Tenacidad.- Es la energía que se absorbe por un metal antes de romperse en condiciones de impacto por acumulación de fuerza deformante.

Rigidez Es el esfuerzo requerido para producir una deformación dada. Se mide a través de la obtención del módulo de elasticidad para carga axial (E). Y representa la tangente de la pendiente en la gráfica esfuerzo vs deformación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1.- Ackert D., Beardsell M., Corrigan M. y Newman ken, The Coiled Tubing Revolution Oilfield Review 1. No.3 (Octubre de 1989).

2.- Bourgoyne, A.T. Jr., Millheim, K.K., Chenevert, M.; Applied Drilling Engineering. Richardson, Texas, (1986).

3.- Brown M.W. y Miller K.J., A theory for fatigue failure under multiaxial stress-strain Conditions. Inst. Mech. Engrs, (1973).

4.- G. T., Smith B. E.; Coiled Tubing Practices at Prudhoe Bay. SPE, (marzo 1996).

5.- Hernandez Chontal Homero, Fatiga Mecánica de materiales. BUAP, (1997) .

6.- Mitchell M.R. y R.W. Laqngraf, Fatigue Life time Predictive. Techniques American Socyety for Testing and Materials, (1996).

7.- M.R.Mitchell y R.W. Landgraf., Multiaxial Plasticity and Fatigue Life Prediction in Coiled Tubing. (1992).

8.- National Oilwell Varco, esfuerzos en tuberías. (2010).

9.- Newman Ken, Tubing limits for burts and collapse. (2002).

10.- Newman Ken y Bhalla Kennet, The effective forces. (1999).

11.-Newman Ken y Brown P.A., Development of a Standard Coiled-Tubing Fatigue Test. Houston Texas, (1993).

12.- Newman Ken y Newburn D. A., Coiled-Tubing-Life Modeling. Dowell Schlumberger Dallas Texas, (1991).

13.- Ortiz Berrocal Luis, Resistencia de materiales. editorial Mc Graw-Hill Madrid, (2007).

14.- Ortiz Luis, Resistencia de materiales. Madrid: Ed. McGraw-Hill, (2007).

15.- Pemex, Diplomado de actualización en ingeniería petrolera. (2011).

16.- Pemex, Manual de Operaciones con tubería flexible. (2014).

17.- Popov P Egor, Introducción a la mecánica de sólidos. Editorial limusa grupo noriega editores, (1992)

18.- Publicaciones de Schlumberger, Coiled Tubing completions. (2014).

19.- Quality Tubing, Technical catalog workstring. Hang-off Coiled Tubing and Coiled line pipe. Texas, (2004).

20.-Servicios Petrotec S. A. de C. V., Manual técnico para el operador de TF. (2012).

21.-Shigley Joseph Edward, Diseño en ingeniería mecánica. (1985).

22.-Steven M. Tipton, and Gregory H. Carlson James R., Fatigue Integrity Analysis of Rotating Coiled Tubing. (2006).

23.- Tenaris, Simulación y análisis mecánico de perforación con casing. Argentina, (2008).

24.- Tipton, S. M., Coiled Tubing Deformation Mechanics: Diametral Growth and Elongation. SPE, (1996).

25.- University of Michigan, Materials Under Conditions of Thermal Stress. Engineering Research Institute Behavior, Heat Transfer Symposium; (1963).

26.- V Avakov, J.C. Foster, and E.J. Smith, Coiled Tubing Life Prediction. (1993).

27.- Wu Jiang, Coliled Tubing Working Life Prediction. SPE Oklahoma, (1995).

Páginas WEB:

www.es.jereh-pe.com

http:/qualitytubing.com/slideb07.html