



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y
ARQUITECTURA
UNIDAD TICOMÁN**



SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

INGENIERÍA DE FATIGA APLICADA AL DISEÑO DE LA PERFORACIÓN ECONÓMICA ADMINISTRATIVA DE UN POZO PETROLERO.

TESIS:

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN GEOCIENCIAS Y
ADMINISTRACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES.**

PRESENTA:

ROBERTO JUAREZ LOPEZ.

DIRECTOR DR. MARIO ULLOA RAMIREZ.

DIRECTOR DR. DANIEL ROMO RICO.

MEXICO, D.F; OCTUBRE 2011.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 14:30 horas del día 24 del mes de Agosto del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIA-U.Ticomán para examinar la tesis titulada:
"Ingeniería de fatiga aplicada al diseño de la perforación económica administrativa de un pozo petrolero"

Presentada por el alumno:

Juárez

López

Roberto

Apellido paterno

Apellido materno

Nombre(s)

Con registro:

B	0	9	1	9	2	0
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRIA EN GEOCIENCIAS Y ADMINISTRACION DE LOS RECURSOS NATURALES

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis


DR. MARIO ULLOA RAMIREZ



DR. DANIEL NOMO RICO


DR. CAYETANO MIGUEL GARCIA REYES


M. en C. RODRIGO MONDRAGON GUZMAN


M. en C. LEOBARDO SALAZAR PEÑA

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES


ING. JULIO E. MORALES DE LA GARZA



***INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO.***

CARTA CESIÓN DE DERECHOS.

En la Ciudad de México, D. F el día 20 del mes de Octubre del año 2011, el que suscribe Roberto Juárez López alumno del Programa de Maestría en Geociencias y Administración de los Recursos Naturales con número de registro B091920, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado de Investigación-ESIA-Ticomán, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Mario Ulloa Ramírez y Dr. Daniel Romo Rico y cede los derechos del trabajo intitulado “Ingeniería de Fatiga aplicada al Diseño de la Perforación Económica Administrativa de un Pozo Petrolero”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección otrebtor_340@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Roberto Juárez López
Nombre y firma

AGRADECIMIENTOS.

A Dios.

Al Instituto Politécnico Nacional, en especial a la ESIA – Ticomán.

En memoria de mi madre: Antonieta López Gallo. (q.e.p.d)

Dedico esta tesis de maestría con amor, cariño y respeto:

A mi hermana karina Patricia Juárez López.

A mi padre Roberto Juárez Pedraza.

A mi familia en general con la cual siempre he contado con su apoyo en incondicional en todos los momentos de mi vida.

A mi nueva familia la cual me ha brindado la confianza y el amor al estar con ellos.

A mis amigos que nunca han dejado de creer en mí.

Y sobre todo al amor de mi vida, mi esposa Gabriela, quién me motiva a seguir adelante para realizar mis sueños, y que ahora son de los dos. Te amo.

Sí, tengo un sueño. Viene de Dios. Es mayor que todos mis dones. Es tan grande como el mundo, pero comienza con uno.

INGENIERÍA DE FATIGA APLICADA AL DISEÑO DE LA PERFORACIÓN ECONÓMICA ADMINISTRATIVA DE UN POZO PETROLERO.

ABSTRACT.

RESUMEN.

CAPÍTULO I.- INTRODUCCIÓN.

- 1.1 Objetivos de la investigación.
- 1.2 Hipótesis.
- 1.3 Justificación.
- 1.4 Planteamiento del problema y metodología utilizada.
- 1.5 Caso de estudio.
- 1.6 Aportaciones originales al análisis de fatiga.
 - 1.6.1 Los modelos Weibull y Gunbell basados en campo S-N.
 - 1.6.2 Análisis del daño acumulado.
- 1.7 Complejidad de la Ingeniería de Fatiga y la innovación dentro del conocimiento.

CAPÍTULO 2.- ESTADO DEL ARTE.

- 2.1 Introducción al problema de Fatiga.
- 2.2 Conceptos de Fatiga.
- 2.3 Versus de curvas de esfuerzo en tiempo vida (S-N).
- 2.4 Fatiga bajo el punto de vista de mecánica de fractura.
- 2.5 Enfoque basado en el esfuerzo de a la fatiga.
- 2.6 Información general en base al diseño de la sarta de perforación.
- 2.7 Índice de Métodos en el diseño de Sarta de Perforación.

CAPÍTULO 3.- IMPLEMENTO DEL BALANCE SCORECARD.

- 3.1 Enfoque metodológico.

- 3.2 Traducción de la estrategia.
- 3.3 Desafíos estratégicos modificados.
- 3.4 Desafíos estratégicos identificados.
- 3.5 Mapa estratégico de la Aplicación de la Ingeniería de Fatiga. Versión 1.
- 3.6 Mapa estratégico de la Aplicación de la Ingeniería de Fatiga. Versión 2.
- 3.7 Mapa estratégico de la Aplicación de la Ingeniería de Fatiga. Versión 3.
- 3.8 Resultado de las entrevistas ejecutivas.
- 3.9 Fundamentos de Diseño.
- 3.10 Mapa estratégico de la Aplicación de la Ingeniería de Fatiga. Versión 4.
- 3.11 Mapa estratégico de la Aplicación de la Ingeniería de Fatiga. Versión 5.
- 3.12 Mapa estratégico de la Aplicación de la Ingeniería de Fatiga. Versión 6.
- 3.13 Mapa estratégico de la Aplicación de la Ingeniería de Fatiga. Versión 7.
- 3.14 Indicador BSC AIF.
- 3.15 Iniciativa BSC AIF.

CAPÍTULO 4.- ANÁLISIS DE RESULTADOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA INGENIERÍA DE FATIGA. ANÁLISIS CAUSA RAÍZ.

- 4.1 Análisis causa raíz primer pez a 1234 m, Pozo Exploratorio Chaya 1 A.
 - 4.1.1 Fractura de piñón del estabilizador sobre el Drill Collar Monel.
 - 4.1.1.1 Falla en el material del estabilizador.
 - 4.1.1.2 Desbalance en conexión Drill Collar Estabilizador (BSR).
 - 4.1.1.3 Desgaste en rosca de piñón del estabilizador.
 - 4.1.1.4 Torque inadecuado en junta del estabilizador.
 - 4.1.1.5 Mala calidad del acero del estabilizador.
 - 4.1.1.6 Alta vibración lateral en Sarta de Perforación. (Ingeniería de Fatiga).

4.1.2 Árbol Lógico.

4.2 Análisis causa raíz segundo pez a 1272 m, Pozo Exploratorio Chaya 1 A.

4.2.1 Fractura y Lavado del piñón de sustituto.

4.2.1.1 Falla en el material del sustituto.

4.2.1.2 Desbalance en conexión de sustituto y amplificador.

4.2.1.3 Alta vibración lateral en Sarta de Perforación. (Ingeniería de fatiga).

4.2.2 Árbol Lógico.

4.3 Análisis causa raíz tercer pez a 1397 m, Pozo Exploratorio Chaya 1 A.

4.3.1 Fractura del Piñón Doble.

4.3.1.1 Falla en material Transmitter Sub.

4.3.1.2 Alta vibración lateral en Sarta de Perforación. (Ingeniería de Fatiga).

4.3.2 Árbol Lógico.

4.4 Análisis causa raíz cuarto pez a 1885 m, Pozo Exploratorio Chaya 1 A.

4.4.1 Fractura de caja del primer Drill Collar.

4.4.1.1 Falla en el material del Drill Collar.

4.4.1.2 Desbalance en Conexión de Drill Collar.

4.4.1.3 Torque inadecuado en junta de Drill Collar.

4.4.1.4 Mala calidad del acero de Drill Collar.

4.4.1.5 Alta vibración en la Sarta de Perforación. (Ingeniería de Fatiga).

4.4.1.2 Árbol Lógico.

4.5 Pozo Exploratorio Bricol 2DL, Aplicación de la Ingeniería de Fatiga.

4.5.1 Software Dinámico para el diseño de sarta (Vibrascope).

4.5.2 Sensores de Vibración.

4.6 Nuevo Modelo de Sarta de Perforación con la AIF.

4.6.1 Vibraciones transversales de la sarta de perforación.

4.6.2 Descripción general del modelo.

4.6.3 Análisis dinámico transversal.

4.6.4 Análisis estático.

4.6.5 Análisis dinámico.

4.7 Diseño de Sarta de Perforación con el nuevo modelo de la AIF.

4.7.1 Black Box.

4.7.2 Estabilizador con rodillo.

4.7.3 Amortiguador.

4.7.4 Software dinámico para el diseño de sarta (vibrascope).

4.7.5 Sensores de vibración.

4.7.6 Agitator Tool.

4.7.7 Tubería de aluminio.

4.7.8 Esquema del Nuevo Modelo de Sarta de Perforación.

4.7.9 Implementación de QA/QC.

CAPÍTULO 5.- ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO.

5.1 Propuesta Financiera para la AIF.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

BIBLIOGRAFÍA.

GLOSARIO.

LISTA DE FIGURAS.

LISTA DE TABLAS.

ABSTRACT.

In the present research as a contribution to the knowledge of the engineering behavior of metallic materials Fatigue under cyclic loading, we propose a new model of string design to minimize fatigue.

It describes some of the methods and tools used alternatives to trade, especially those related piping and connections.

The experience gained through study, analysis, proposals, and conducting operations with alternative products can anticipate that in many cases, the use of techniques or products that produce significant financial savings. This search option has increased as a result of changes in deposits due to increased secondary recovery, to search for new productive horizons, the depletion of the layers, and others. To mitigate these problems, we have developed new materials, new steels and prediction methods.

Maybe some of them are not complete and definitive solution, but taking into account the economic studies generally found that help reduce the cost of extraction. The present challenge in the design and selection, to an oil and gas, is given by what is required to fetch the mineralized reservoirs at greater depths, where the values of external pressure, the presence of hydrogen sulfide (H₂S), carbon dioxide (CO₂), temperature, slope, paths and others, often indicated as the use of steel from specially formulated for these environments (Steels for High Collapse, for sour service, to deep wells.) connections or using specially designed.

This master's thesis shows the application of a new technique to compare the relative fatigue life of drill pipe being rotated in directional holes, using the administration of drilling an oil well. This novel approach called Curvature Index (CI) comparing the different designs for combined fatigue effects of the curvature of the hole, pipe size, weight, schedule, class and axial tension in the tube.

RESUMEN.

En el presente trabajo de investigación, como una aportación en el conocimiento del comportamiento de la Ingeniería de Fatiga en materiales metálicos sometidos a cargas cíclicas, se propone un nuevo modelo de diseño de sarta para minimizar la fatiga

Se describe algunos de los métodos y herramientas alternativas más empleadas para realizar operaciones, especialmente en los que están relacionadas la tubería y las conexiones.

La experiencia lograda mediante el estudio, análisis, propuestas, y realización de operaciones con productos alternativos permite anticipar que en muchos de los casos, el empleo de técnicas o productos distintos que produce un importante ahorro económico. Esta búsqueda alternativa, se ha incrementado como consecuencia de los cambios producidos en los yacimientos debido al incremento de la recuperación secundaria, a la búsqueda de nuevos horizontes productivos, a la depletación de las capas, y otros. Para mitigar estos problemas, se han desarrollado nuevos materiales, nuevos aceros, y métodos de predicción.

Tal vez algunos de ellos no sean la solución total y definitiva, pero teniendo en cuenta los estudios económicos, generalmente se observa que ayudan a reducir los costos de extracción. El desafío presente en el diseño y selección, para un pozo de petróleo y gas, está dado por las exigencias que implica ir a buscar los reservorios mineralizados a mayor profundidad, en donde los valores de presión externa, presencia de ácido sulfídrico (H_2S), dióxido de carbono (CO_2), temperatura, inclinación, trayectorias y otros, muchas veces indican como procedente el uso de aceros especialmente formulados para estos ambientes (Aceros para Alto Colapso, para Servicio Agrio, para Pozos Profundos.), o el uso de conexiones especialmente diseñadas.

Esta tesis de maestría muestra la aplicación de una nueva técnica para comparar las vidas de fatiga relativas de las tuberías de perforación que están siendo rotadas en los agujeros direccionales, utilizando la administración de la perforación de un pozo petrolero. Esta metodología novedosa, denominada Índice de Curvatura (IC) compara los diferentes diseños para los efectos de fatiga combinados de la curvatura del agujero, tamaño del tubo, peso, cédula, clase y tensión axial en el tubo.

INGENIERÍA DE FATIGA APLICADA AL DISEÑO DE LA PERFORACIÓN Y ECONOMÍA DE UN POZO PETROLERO.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

Los trabajos existentes en la literatura de ingeniería de fatiga muestra que aún no han resuelto todavía el problema de la acumulación de daño debida a una historia de cargas arbitraria, ni desde el punto de vista teórico ni desde el punto de vista práctico y de laboratorio. Este problema es sin embargo crucial en la ingeniería petrolera para el diseño de sartas de perforación. Se plantea el desarrollo de distintos modelos de acuerdo al pozo programado para que sirva como base en el análisis del desarrollo del proyecto, minimizando la fatiga de diseños de sartas sometidos a cualquier espectro de carga en cualquier rango de la misma (tensión, compresión o mixto).

Se pretende por tanto, dar una respuesta teórica y práctica a un campo de investigación ampliamente explorado, pero que no ha llegado a obtener una expresión de resultados que involucre conceptos estadísticos, físicos y del comportamiento del material para el tipo de carga descrito anteriormente, y sobre todo del comportamiento económico de manera que sirva como base para el comienzo de una nueva forma de abordar el diseño de nuevos modelos. Las principales motivaciones de esta tesis de maestría son dos. La primera de ellas es el ahorro económico que supone un buen conocimiento del comportamiento de las sartas de perforación frente al fenómeno de la fatiga. Los daños por fatiga siguen siendo de los más elevados en el diseño ingenieril al igual que las inversiones realizadas para su prevención. El costo anual debido a la fatiga de las sartas de perforación en los pozos de perforación es de alrededor de un 3% del proyecto a invertir.

El otro motivo es el aumento de la eficiencia en el cálculo de la vida última (comportamiento a fatiga) de un material sometido a cargas cíclicas.

Las vibraciones mecánicas presentes en las sartas de perforación tienen gran influencia en el rendimiento de la perforación de pozos petroleros. Éstas se pueden clasificar en tres tipos según su dirección: axial, torsional y lateral o transversal; ésta última es la responsable en la mayoría de los casos, de las fallas en las herramientas y componentes del ensamblaje de fondo.

Dentro de un proceso integrado de control de vibraciones, el modelaje y simulación de las sartas de perforación constituye una actividad fundamental en la fase de análisis y planificación de los programas de perforación de los pozos.

Por lo que se ha detectado la importancia de la misma, para lograr el incremento del rendimiento en el proceso de perforación. En esta tesis de maestría, se presentan los fundamentos teóricos y metodológicos de modelaje mediante el

método de elementos finitos, considerando la dinámica de la sarta de perforación cuando se encuentra en operación. De esta manera se podrán conocer las frecuencias y los modos de vibración transversales a las cuales está sometido el Ensamblaje de Fondo (BHA) de la Sarta de Perforación, para así evitar el efecto de fatiga y hacer más efectivo el proceso.

Los desplazamientos y esfuerzos asociados con las vibraciones, no son significativamente grandes hasta que el sistema es excitado con una señal a una de sus frecuencias naturales, lo que causa la resonancia. La mayor fuente de excitación es la velocidad de giro. Si el BHA posee una frecuencia natural transversal, axial o torsional cercana a la velocidad de rotación y ese modo no se encuentra bien amortiguado, entonces existe un peligro de resonancia en el ensamblaje de fondo que puede originar una falla debido a fatiga. La interacción roca-barrena es otra de las fuentes de excitación, la cual puede estar bien amortiguada si la formación es blanda; pero si la formación es dura, se generan frecuencias debido al impacto de los dientes o insertos de la mecha.

Las frecuencias resonantes transversales dependen principalmente de las dimensiones y rigidez de los elementos de la sarta, de la ubicación y holgura de los estabilizadores, del peso aplicado sobre la barrena y de la inclinación de agujero.

Este último parámetro es de suma importancia, ya que es uno de los factores que determina el punto en el cual la tubería por encima del último estabilizador hace contacto con las paredes del agujero, estableciendo efectivamente la longitud del sistema vibratorio transversal. Por este motivo, la vibración transversal no se puede apreciar en la superficie, a menos que se acople con los modos axiales y torsionales.

1.1 Metas y objetivos de investigación.

1. Analizar el estado del arte de la fatiga del material en la sarta de perforación donde se muestren los principales modelos usados hasta la fecha para la estimación y el análisis del comportamiento del material sujeto a cargas cíclicas. Realizar una discusión de las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.
2. Detectar los principales problemas existentes en estos diseños.
3. Desarrollar un nuevo diseño para la fatiga del material que cubra todo el rango de cargas (tensión y compresión) para el campo de Waohler para cualquier historia de carga. La derivación del modelo estaría basada en la teoría de ecuaciones funcionales.
4. Realizar una discusión de las medidas de daño actuales y proponer nuevas, seleccionando las más adecuadas para el análisis a fatiga.
5. Analizar el daño acumulado con los modelos probabilísticos propuestos.
6. Proponer un procedimiento adecuado en la obtención de los mejores resultados de laboratorio posibles y por lo tanto, las mejores estimaciones para los parámetros de los diseños de sartas en la perforación.
7. Diseñar una serie de ensayos experimentales prácticos para la evaluación y validación del modelo teórico en campo petrolero.
8. Analizar los resultados obtenidos para validar el modelo en la perforación del pozo petrolero
9. Basándose en los resultados obtenidos y su análisis, presentar las principales conclusiones del trabajo realizado.
10. Comprende el estudio de actividades que consisten en la auditoria de calidad tales como:
 - Auditoría de Instalaciones.
 - ✓ Compañías de Inspección.
 - ✓ Vendedores de herramienta.
 - Talleres de maquinaria.
 - Documentar prácticas y procedimientos.

- Enumerar actividades no conformes.
11. Minimizar tiempo y costo en el desarrollo del proyecto de la perforación del pozo.

1.2 Hipótesis.

Actualmente, para el análisis de ingeniería de fatiga en el diseño de sartas de perforación, hoy en día no satisfacen todas las condiciones físicas, experimentales y estadísticas para una adecuada perforación, y más aún si ésta es direccional. Un modelo útil para explicar el comportamiento de las sartas de perforación debe satisfacer estas condiciones.

1. Los diseños utilizados en esta investigación son normalmente metálicos y longitudinales.
2. Se supone el principio del eslabón más débil: Si un elemento longitudinal es dividido en subelementos, la vida última del material vendrá dada por la vida última del elemento más débil.
3. Se supone que la acumulación del daño en un material comienza cuando la probabilidad de fallo es nula, y el fallo total se produce cuando dicha probabilidad es igual a uno.

Por lo tanto la **hipótesis de investigación** para el presente trabajo es:

Aplicando la Ingeniería de Fatiga y dando continuidad a este proceso, se minimizan los costos y tiempos económicos administrativos de la perforación de un pozo, proporcionando un nivel de confiabilidad adecuado al proyecto.

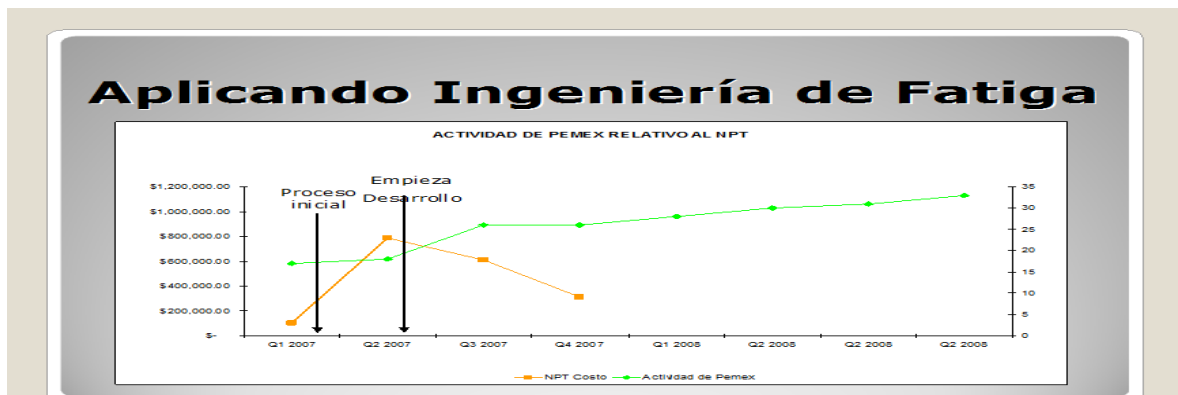


Figura 1. Aplicando Ingeniería de Fatiga, se puede observar como el costo en color café decremanta reduciendo con esto el costo y tiempo de perforación de un pozo petrolero. Si no se aplica la Ingeniería de Fatiga el costo y el tiempo puede aumentar, como se observa en la línea verde.

1.3 Justificación.

La ingeniería de fatiga es progresiva y el daño se localiza en la estructura, esto ocurre cuando el material está sujeto a cargas cíclicas. La primera búsqueda en este campo descubierta (siglo 19), fue la representación de cargas contra el tiempo a fallar, la relación entre estas dos variables puede existir. Esta relación puede ser representada por diferentes expresiones matemáticas como se muestra en la figura de la derecha 2, donde es posible observar algunos de estas diferentes representaciones. Encontrar la mejor expresión para definir el tiempo de falla esta sujeta a una pieza que tenga fatiga y es una de los más importantes objetivos de esta búsqueda.

El mecanismo de fatiga esta representado prácticamente en toda la estructura.

Las fallas de fatiga en la sarta de perforación continúan para ser una carrera concerniente al diseño de la ingeniería petrolera. El costo económico de la fatiga en una sarta de perforación es demasiado alto y esto envuelve situaciones en donde los proyectos rebasan el cálculo económico estimado para el proyecto. Pero estos costos pueden disminuir si se tiene una prevención en la fatiga. Así que una de las principales motivaciones de esta tesis de maestría es un nuevo modelo de diseño los cuales salven los costos económicos en la realización de la perforación de un pozo petrolero, ya que actualmente se diseña el pozo tomando los costos.

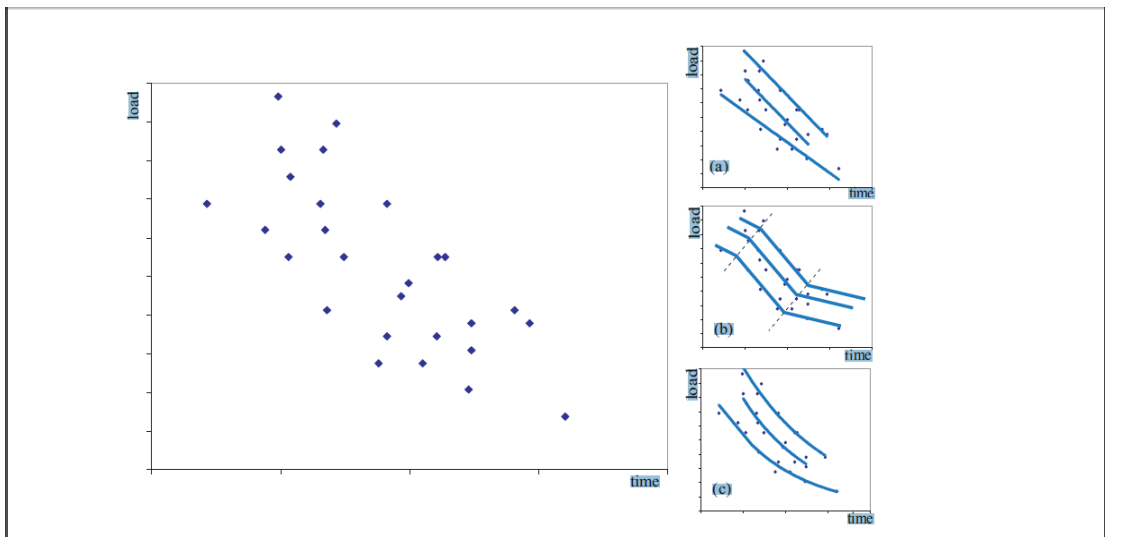


Figura 2: Representación esquemática de una fatiga típica y algunos diferentes cuadros: a) lineal, b) semi lineal, c) no lineal

La meta de una revisión de operaciones es encontrar una causa raíz operacional para la falla de la sarta de perforación. Esto no es precisamente posible en todas las ocasiones, pero usualmente es viable determinar posibles causas. El valor que este análisis operacional pueda tener y aportar está directamente relacionado con la información que se tenga disponible. La información que se debe obtener es:

- 1.- Diagrama actual (no planeado) del pozo o su equivalente (incluyendo pesos del lodo, profundidad de la tubería de revestimiento, diámetros del hoyo, profundidad del agua).
- 2.- Estudio del pozo (md, inc, azm). Este debe estar en formato electrónico (ASCII o Excel).
- 3.- Configuración del BHA ("Bottom Hole Assembly") utilizada en cada falla (incluyendo nombre del pozo y el número de BHA). Esta configuración incluye dimensiones y detalles para cada BHA como son la longitud, OD/ID del cuerpo, tipo de conexión y OD del box y ID del pin.
- 4.- Configuración de la tubería de perforación (sarta) para cada uno de los fallos (tubería normal y/o de paredes gruesas).
- 5.- Reportes diarios que abarquen los periodos de tiempo relevantes.
- 6.- Información de Peso Actual vs Profundidad.
- 7.- Información capturada digitalmente del pozo de perforación, se recomienda 1 muestra cada 5 segundos. La información debe abarcar los siguientes campos: Fecha, Hora, Rpm, Torque, Wob, Hookload, Velocidad de Bombeo (pump rate), Presión de Bombeo y Posición del bloque. Otros campos de información deben ser omitidos para mantener el tamaño de los archivos manejable.
- 8.- Un resumen de la información geológica del pozo, incluyendo tipo de formación y concentraciones de H₂O o presiones parciales.
- 9.- Cualquier información operacional de los equipos MED, tal como Rpm en la profundidad del pozo, presión severidad de descarga ("shock severity"). Etc.
- 10.- Información almacenada de motores como puede ser dimensiones, localización de los estabilizadores, configuraciones, presión diferencial.

La lista anterior representa un conjunto mínimos de información requerida para elaborar una revisión operacional de buena calidad. En el caso de alguna revisión en particular, es posible sea necesario requerir información más específica dependiendo de las necesidades particulares del análisis.

1.4 Planteamiento del problema.

El Análisis e implementación de la Ingeniería de Fatiga en la perforación de un pozo petrolero para el caso de la Unidad Operativa de Comalcalco; Tabasco, aportaría grandes beneficios en cuánto a tiempos y costos del proyecto; actualmente el 95% de los pescados son originados por la falla de la ruptura de la Tubería de perforación, provocando un incremento en los tiempos de perforación y elevación en los costos sumamente importante, (en el año 2008 en la Unidad Operativa Comalcalco, se originaron 11 pescados en cinco diferentes pozos de los cuales solo en tres se tuvo éxito con la pesca).

Aplicando la Ingeniería de Fatiga, se consideran que se reducirían los incidentes originados por falla en Tubería de perforación.

La definición de una buena metodología trae consigo la obtención de buenos resultados y una buena organización en tiempo y trabajo. Se han seguido los siguientes pasos.

1. Análisis del problema: ¿cuáles han sido los hechos a lo largo de la historia que han propiciado que el hombre se interese por ese problema y quiera solucionarlo?
2. Comprensión del problema: Se realiza un análisis de las causas que provocan esas situaciones y entran a tomar parte de su evolución y desarrollo. Como definición del término *fatiga de materiales*.
3. Desarrollo: Se establecen las bases y se desarrollan las aportaciones científicas necesarias para el análisis de materiales sujetos a este tipo de solicitaciones.
4. Ensayos experimentales: cuyo objetivo es la obtención de datos que posteriormente se analizarán para contrastar con el modelo teórico propuesto en el punto anterior.
5. Análisis de los resultados obtenidos: cuyo objetivo es la validación del modelo teórico.

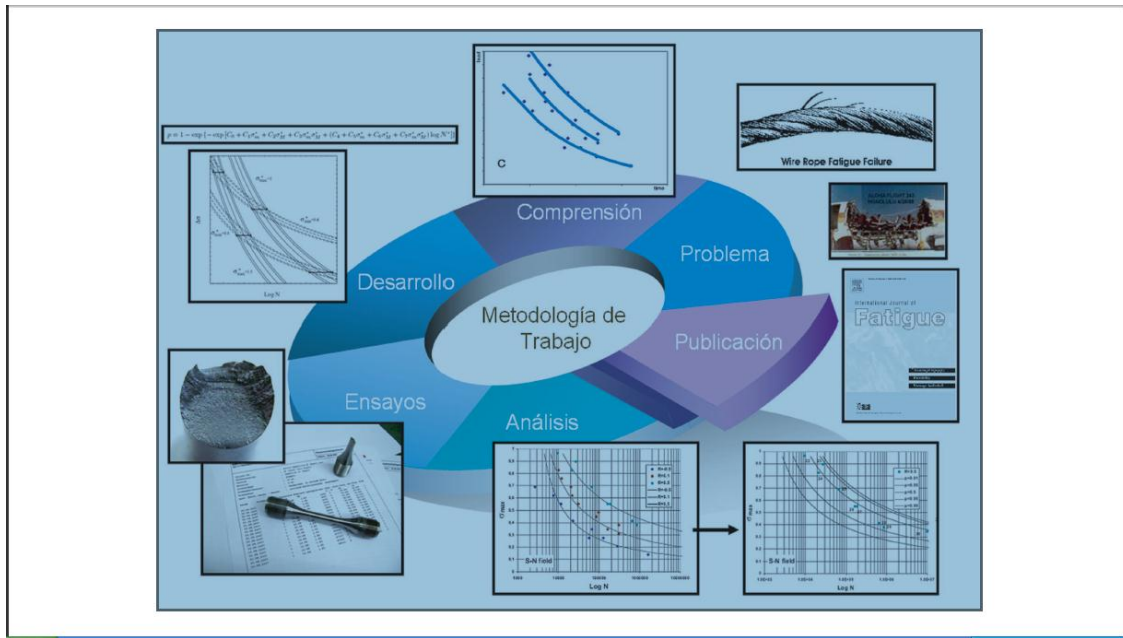


Figura 3. Metodología del trabajo aplicando conceptos teóricos para desarrollar una mejor eficiencia en el rubro.

1.5 Análisis de campo de estudio.

En 2003, durante la perforación de un pozo exploratorio en la región de la costa del Golfo, cinco fallas por fatiga de sarta de perforación ocurrieron dentro de un período de seis días. En un punto, un tubo que había sido recientemente inspeccionado, colapsó después de perforar sólo durante 9 ½ horas. Todas las fallas ocurrieron en el mismo intervalo de profundidad somera.

La investigación no mostró ningún problema metalúrgico con la sarta de perforación y ningún problema aparente con la trayectoria, conforme los datos de la medición MWD (tomados a intervalos de 100-ft) mostraron una severidad de pata de perro menor que 1°/100 ft sobre el intervalo de interés. Sin embargo, debido al número de fallas en la misma ubicación, el operador corrió un gyro de medición a través del intervalo problema en estaciones de 5 ft. Esta medición mostró una pata de perro de alrededor de 20°/100-ft en el intervalo donde las fallas estaban ocurriendo. La fatiga fue claramente el mecanismo de falla, y debido a la probabilidad de más fallas, la factibilidad económica de perforación continua fue predicha como cuestionable.

Reporta la aplicación en campo del Índice de Curvatura para diseñar una sarta de perforación. En el caso citado, el operador experimenta fallas repetidas en la sarta en un intervalo de agujero, con una falla ocurriendo en la tubería habiendo rotado menos de 10 horas de rotación desde la inspección. Aunque la medición direccional (tomada a intervalos de 100-pie) mostró una severidad máxima de pata

de perro de un grado /100 pies, una medición del gyro corrida a un espaciamiento de cinco-pies a través del intervalo problemático identificó una pata de perro con una severidad de algo así como 20 grados / 100-pies. Bajo estas circunstancias, la habilidad para perforar el pozo hasta la profundidad objetivo fue puesta en duda. Los diseñadores emplearon el Índice de Curvatura para diseñar una sarta que era algo así como 230 por ciento más resistente a fatiga que los diseños que habían estado fallando. La configuración de la sarta resultante, junto con varias otras mejoras, permitió al operador completar con éxito el pozo sin más incidentes.

En el caso de Inspecciones pobremente realizadas y deficiencias metalúrgicas, se realizan análisis inequívocos por auditores de inspecciones y análisis de fallas metalúrgicas; pero en el caso de las costumbres operacionales no se tiene tanta claridad, incluyendo parámetros como el diseño de la sarta, el diseño del pozo, las formaciones geológicas presentes y los diferentes parámetros configurables (RMP, WOB, etc.) en el pozo. En estos casos, donde existe la oportunidad de aprender y/o optimizar, es muy ventajoso efectuar una revisión detallada de las operaciones.

- A su vez identifica un número de prácticas de baja calidad siendo ejercidas por compañías de servicio durante inspecciones, ya que las compañías no siguen sus propios procedimientos o sus mejores prácticas.
- La calidad del equipo pobre.
- Se identifica quizás las configuraciones del BHA que no eran las mejores para disminuir los daños producidos por fatiga.
- Frecuencia de inspecciones inadecuadas.

Tomado del artículo. IADC / SPE 87188. Un enfoque de diseño innovador para reducir la fatiga de la sarta de perforación. Tom Hill, P.E., SPE, Sean Ellis, SPE, Kang Lee, PhD, SPE, Nicholas Reynolds, SPE, Nanjiu, Zheng, PhD, T H Hill Associates, Inc.

1.6 Aportaciones originales.

1.6.1 Los modelos Weibull y Gunbell basados en campo S-N.

Algunos de los aspectos que se estudian son las condiciones tanto físicas, como estadísticas y de compatibilidad que definen el problema, las restricciones del modelo, las propiedades del mismo, los submodelos resultantes y los métodos de estimación propuestos para el conocimiento de los parámetros del modelo.

Se propone en primer lugar un modelo general de fatiga que incluye la consideración de la tensión media, con un modelo probabilístico tipo Weibull de 9 parámetros. Posteriormente, tras el análisis del mismo se llega a la expresión final

de un modelo probabilístico tipo Gumbel basado en 8 parámetros característicos del material. Las principales aportaciones de este modelo son:

- De acuerdo con el Teorema de Buckingham, solo deben utilizarse variables adimensionales en modelos de regresión. Esto implica que el modelo sea sencillo y que los parámetros obtenidos a su vez sean variables adimensionales.
- El modelo no se basa en hipótesis arbitrarias, sino en propiedades físicas y estadísticas que son necesarias en cualquier modelo de fatiga.
- El modelo revela información estadística que no solo incluye valores medios, sino que analiza la variabilidad del modelo y con ello, el conocimiento de la probabilidad en cada momento.
- El modelo puede usarse para todo el rango de cargas: tensión, compresión y/o mixto.
- El modelo puede extrapolarse a cualquier otra condición de cargas tras la estimación de los parámetros característicos del material.

Considérese un material sujeto a unas cargas constantes mínimas y máximas que denominaremos $\frac{3}{4}m$ y $\frac{3}{4}M$ por simplicidad. Sabiendo que N es el número de ciclos al que este material rompa, el objetivo es conocer la probabilidad de rotura p del material sujeto a dichas cargas. Para la derivación del modelo se tiene en cuenta que p está relacionada con los términos N ; $\frac{3}{4}m$ y $\frac{3}{4}M$. Con estos conceptos en mente, el procedimiento es el siguiente:

$$p = 1 - \exp \left\{ - \left[\frac{(\log N^* - B) (\sigma_M^* - \sigma_m^* - C) - E}{D} \right]^A \right\}, \quad (1.1)$$

Donde A representa el parámetro de forma de la función de distribución tipo Weibull; B , representa el valor límite en la vida última del material, asíntota vertical de la curva S-N; C , el límite de endurancia; E , define la posición en la que se encuentra el percentil cero de la hipérbola y D , representa de escala de la función de distribución de Weibull.

Sabiendo que si se toma $A \rightarrow \infty$ el modelo pasa a ser tipo Gumbel, la expresión final del modelo propuesto es:

$$p = 1 - \exp \left\{ - \exp \left[C_0 + C_1 \sigma_m^* + C_2 \sigma_M^* + C_3 \sigma_m^* \sigma_M^* + (C_4 + C_5 \sigma_m^* + C_6 \sigma_M^* + C_7 \sigma_m^* \sigma_M^*) \log N^* \right] \right\}, \quad (1.2)$$

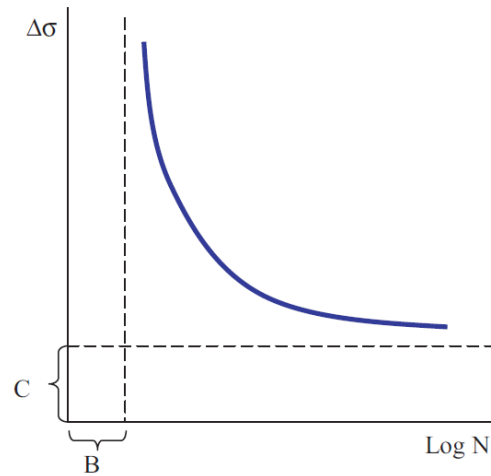


Figura 4. Representación esquemática de las variables B Y C.

Con el fin de usar el modelo en la práctica, se definen ahora una estrategia basada en los siguientes pasos:

Paso 1: *Diseño de la estrategia de ensayos.* Se definen el número de series así como la distribución tensional de los distintos puntos a ensayar, intentando cubrir el mayor rango tensional posible.

Paso 2: *Elección de las variables normalizadas N_0 y $\frac{3}{4}0$.* Con ellas se realiza la adimensionalización de las variables.

Paso 3: *Estimación de los parámetros del modelo.* Utilizando para ello cualquiera de los dos métodos definidos anteriormente.

Paso 4: *Extrapolación del problema a otras condiciones tensionales cualesquiera.* Empleando los parámetros $C_1; C_2; C_3; C_4; C_5; C_6; C_7$, $\log N_0$ y $\frac{3}{4}0$ para cualquier otra condición de ensayos.

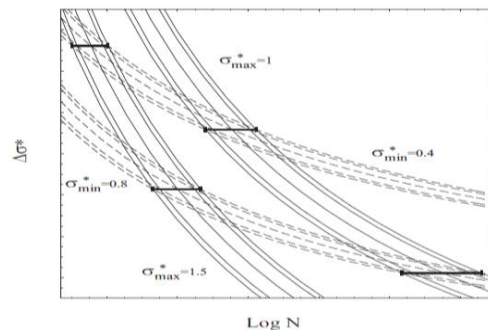


Figura 5. Esquema de las curvas de Wöhler.

1.6.2 Análisis del daño.

Existen diversas formulaciones para el análisis del daño acumulado, pero como vemos en la tabla 1 la mayoría de ellas no son una buena herramienta para medir el daño en un cierto momento. Algunas de las consideraciones de las propiedades que una medida de daño debe cumplir son:

Propiedad 1.- **Incrementar con el daño:** El daño incrementa cuando incrementa la medida del daño analizada.

Propiedad 2.- **Interpretabilidad:** La medida de daño debe ser clara y comprensible.

Propiedad 3.- **Medida adimensional:** Para evitar problemas de unidades en la estimación de la vida última a fatiga de un material es mejor trabajar con variables adimensionales.

Propiedad 4.- **Conocimiento del rango:** El rango de variación de la medida de daño debe ser fijo, conocido, independiente de la carga y si puede ser, también del material.

Propiedad 5.- **Función de distribución conocida:** Para conocer la probabilidad de fallo de una pieza, es necesario conocer la función de distribución de la probabilidad de esa medida de daño.

Por lo tanto, después de analizar la tabla 1 en función de las propiedades descritas anteriormente, queda claro que la probabilidad de daño, derivada de la expresión del modelo Gumbel para analizar el daño acumulado de un material sujeto a cargas cíclicas.

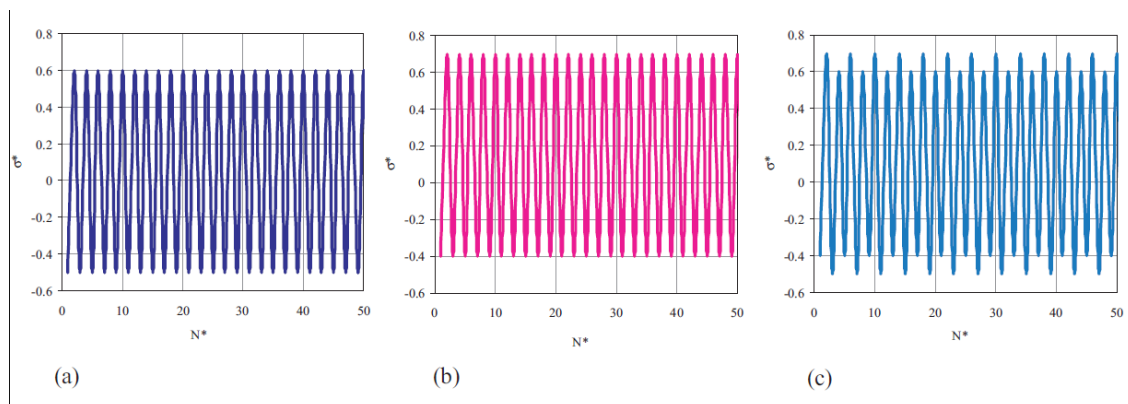


Tabla 1. Diferentes historias de carga utilizadas para el análisis del daño acumulado.

1.7 Los problemas: complejidad y falta de conocimiento específico.

Varios enfoques para mitigar la fatiga han estado disponibles durante años, y muchos intentos se han hecho para aplicarlos a las sartas de perforación. Ninguno de estos intentos ha logrado, todavía, ningún éxito extendido. Estos enfoques pueden ser agrupados en dos amplias categorías. Aquellas que cubren la vida completa de un componente, y aquellas que sólo se aplican a la fase de propagación de la grieta.

Esfuerzo o amplitud de deformación contra vida de fatiga: Estas dos visiones pueden ser ilustradas por las curvas “S-N”, un ejemplo de las cuales es mostrado en la figura 1. El esfuerzo o amplitud de deformación sobre el eje-y se refiere al punto de mayor esfuerzo o amplitud de deformación sobre el componente, no al esfuerzo de volumen sobre el área completa de carga. El eje-x representa la vida total de la fatiga. Esta visión de fatiga tiene la ventaja de aplicarse a ambas fases de inicio y propagación, pero tiene una mayor desventaja en que, durante la fase de inicio de la grieta, el *esfuerzo del punto* es muy sensible a la geometría del componente y condición superficial. (Esta es la razón del porqué las pruebas de fatiga S-N de laboratorio se realizan rutinariamente con especímenes de prueba pulidos). Desafortunadamente, la multitud de concentradores de esfuerzos que están integrados dentro de los componentes de la sarta de perforación, como las tuberías de refuerzo internas en la tubería de perforación y raíces de las cuerdas en las conexiones del BHA, y los cientos de cortes superficiales, melladuras y picaduras que se acumularán durante el servicio, hacen que la determinación del esfuerzo o deformación máxima del esfuerzo del punto esencialmente imposible para el diseñador. Sin este conocimiento, no existe manera para que él o ella ingresen la gráfica y determinen la vida de fatiga esperada. Otra desventaja principal de este enfoque es su sensibilidad a la corrosión ambiental, particularmente en amplitudes de bajo esfuerzo / deformación. Esto también está ilustrado en la figura 7, la que muestra en desempeño del S-N de especímenes idénticos de prueba de acero en ambientes benignos y corrosivos. Un lodo corrosivo no sólo crea más concentradores de esfuerzos (picaduras de corrosión), sino que también acelera el crecimiento de la grieta y evitan que el diseñador use el límite de duración de la fatiga como una herramienta de diseño. Una desventaja final del enfoque S-N es que el diseñador no tiene la manera de conocer la extensión de la fatiga acumulada cuando un componente rentado es sacado. A pesar de estas desventajas, no obstante, la deformación vs. Enfoque de ciclo de vida pueden ser muy útiles para comparar el comportamiento de *inicio* de grieta en los componentes de geometrías diferentes pero conocidas, según se discute a continuación.

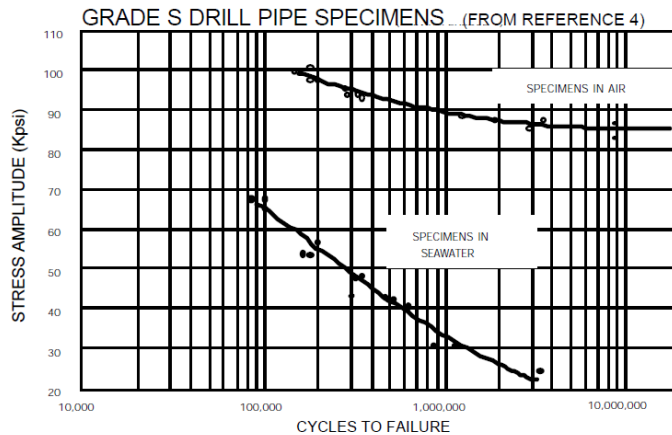


Figura 7. Curva S-N para especímenes de prueba de tubería de perforación para grado S.

Rango de intensidad de esfuerzo vs. Velocidad de crecimiento de la grieta: el otro enfoque general para el diseño de fatiga está ilustrado por la figura 8. Con este enfoque, el diseñador puede negar muchas de las desventajas del enfoque S-N asumiendo que una grieta, justo demasiado pequeña para haber sido encontrada durante la inspección está ya presente en cada uno de los componentes. Cuando un componente va dentro del pozo del diseñador, el crecimiento por ciclo de cada una de las grietas hipotéticas puede ser estimado con base en la severidad y duración del servicio que el componente está experimentando en el agujero. Cuando una grieta hipotética ha (hipotéticamente) crecido lo suficiente para presentar un problema, el componente puede ser retirado de servicio e inspeccionado. Así, cualquier grieta real que verdaderamente ha estado presente al inicio será encontrada antes de que cause un problema. Si no se encuentra ninguna grieta, entonces no existió ninguna inicialmente, y el componente es colocado de vuelta en servicio con una grieta hipotéticamente “re-calibrada a cero”. El uso de este enfoque en las sartas de perforación fue primeramente sugerida por Dale. Las ventajas de esta visión de fatiga son que la geometría del componente y terminado superficial son mucho menos relevantes, ya que una grieta que ya se ha formado (cuando menos hipotéticamente). Así, los concentradores de esfuerzos como los cortes de cuñas y raíces de las cuerdas ya no confunden los cálculos de vida de fatiga. La vida pasada y la fatiga acumulada son grandemente irrelevantes también, ya que la vida de un componente puede ser reiniciada al inspeccionarla. La desventaja de esta visión es que no puede hacerse ninguna representación del comportamiento del componente en la fase de inicio de la grieta.

Cualesquiera de las dos ecuaciones pueden ser usadas para predecir el crecimiento de la grieta: la ecuación de Paris, documentado en la referencia 8 y mostrado como la ecuación 1 abajo, o la ecuación de Forman, de la referencia 9 y mostrado en la ecuación 2. Consideramos a la ecuación de Forman como superior para usarla como una herramienta de diseño, ya que ésta toma en cuenta la relación del esfuerzo mínimo contra esfuerzo máximo (R).

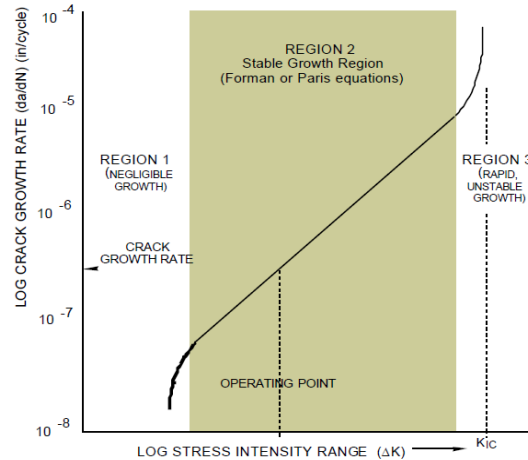


Figura 8. Gráfico de intensidad de esfuerzos vs crecimiento de grieta.

Tomado del artículo. IADC / SPE 87188. Un enfoque de diseño innovador para reducir la fatiga de la sarta de perforación. Tom Hill, P.E., SPE, Sean Ellis, SPE, Kang Lee, PhD, SPE, Nicholas Reynolds, SPE, Nanjiu, Zheng, PhD, T H Hill Associates, Inc.

Curva de velocidad de crecimiento de la grieta.

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n \quad \text{Ecuación de Paris(1)}$$

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K^n}{(1-R) K_{1c} - \Delta K} \quad \text{Ecuación de Forman(2)}$$

Donde:

da/dN = Crecimiento de grieta. (en ciclo)

ΔK = Factor de rango de intensidad de esfuerzo. (ksi√in)

K_{1c} = Factor de Intensidad del esfuerzo crítico. (ksi√in)

R = Radio de esfuerzo.

C = Ecuación de coeficiente de crecimiento de grieta.

n = Ecuación exponencial de crecimiento de grieta.

La visión de la velocidad de crecimiento de la grieta vs. el rango de intensidad del esfuerzo se usa con éxito en muchos campos, más fácil de observar en el aeroespacio. Pero un requisito es que el material debe ser completamente (y muy caro) probado para establecer los valores para las constantes de material C , n , y KIC , de ingresos para las ecuaciones de arriba. También el costo de una falla debe ser bastante grande para justificar los esfuerzos extraordinarios para asegurar que el material de producción duplica consistentemente el material probado contra estas propiedades.

Los costos de falla para las sartas de perforación, mientras hablamos de altos términos de dólares, no enfocan los costos de la falla en las aplicaciones que involucran riesgos para los humanos. Así, los valores para las constantes de material C , n , y KIC , que nuestro diseñador necesita para estimar con precisión el crecimiento de la grieta, no existe para la vasta mayoría de material que ya está en el mercado y disponible para que él o ella lo usen. Tampoco la economía del mercado de renta de sartas de perforación justifica el enorme gasto que requeriría para controlar estas propiedades para el material recientemente fabricado conforme este entra en el mercado.

CAPITULO 2 ESTADO DEL ARTE.

El objetivo de este capítulo es introducir a los lectores en el mundo de la fatiga y entender sus diferentes enfoques.

En este capítulo, se presenta una introducción al problema de fatiga. En la primera sección, se analizan algunas cuestiones de la historia y se presentan algunos conceptos básicos de fatiga.

2.1 Introducción al problema de la fatiga.

2.1.2 El problema de la fatiga en ingeniería.

La historia de las fallas mecánicas debido a la fatiga se ha estudiado o analizado por más de 150 años. Hacia 1828, August Wöhler fue uno de los primeros que probó las cadenas de elevación de minas bajo cargas cíclicas en Alemania, pero comenzó a trabajar la fatiga en Alemania en la década de 1850 y, motivado por los fracasos del eje ferroviario, comenzó a probar los hierros, aceros y otros materiales para diseñar estrategias para evitar el fallo por fatiga. Demostró que la fatiga no se vio afectada sólo por tensiones cíclicas, sino también por el constante acompañamiento (media) de tensiones. Estudios más detallados por seguidores de Wöhler, como Gerber y Goodman, junto con los primeros trabajos sobre la fatiga y los esfuerzos posteriores hasta la década de 1950 se examinan en un documento elaborado por Mann.

En realidad, las fallas por fatiga siguen siendo una preocupación importante en el diseño de ingeniería. Los costos económicos de la fractura y su prevención son bastante grandes, y el 80% de estos costos implican situaciones en las cargas cíclicas que son por lo menos un factor que contribuye al fracaso. Por ejemplo, el costo anual de materiales de la fatiga en los Estados Unidos es de aproximadamente 3% del producto nacional bruto (GPN). Pero, estos costos se derivan de la aparición o la prevención de la falla por fatiga de vehículos terrestres y ferroviarios, aviones, puentes, grúas, equipos, plataformas continentales y objetos domésticos cotidianos como juguetes y equipos deportivos.

Actualmente, existen tres enfoques diferentes para tratar los mecanismos y fracasos de la fatiga. El enfoque basado en el esfuerzo fue desarrollado en 1955, y el análisis correspondiente se basa en las tensiones nominales en la región afectada del componente de ingeniería. El segundo enfoque es el enfoque basado

en la tensión, lo que implica un análisis más detallado del rendimiento localizado que puede ocurrir que el esfuerzo aumente durante la carga cíclica. El último es el enfoque de la mecánica de la fractura, que trata específicamente el crecimiento de las fisuras por los métodos de la mecánica de la fractura.

2.2 Conceptos de fatiga.

2.2.1 Descripción de las cargas cíclicas.

La prueba de esfuerzo de amplitud constante implica ciclos entre esfuerzo mínimo y máximo de niveles constantes.

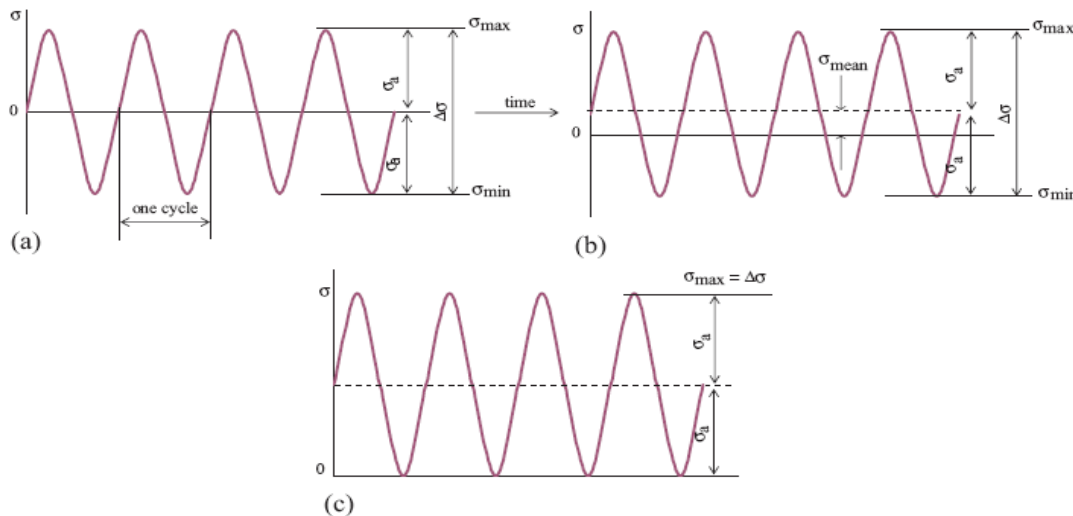


Figura 1. Amplitud constante de esfuerzos mínimos y máximos.

El rango de esfuerzo $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$, es la diferencia entre los valores máximos y mínimos del esfuerzo. Promediando los valores máximos y mínimos se obtiene el esfuerzo medio, σ_{medio} :

$$\sigma_{mean} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}.$$

Otro parámetro importante es la amplitud de esfuerzo, σ_a , es decir, el rango medio del rango del esfuerzo:

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}.$$

Otros dos parámetros útiles para los problemas de fatiga, son la relación de esfuerzos, R, y la relación de amplitud, A:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}; \quad A = \frac{\sigma_a}{\sigma_{mean}}$$

Algunas relaciones interesantes derivadas de todas las ecuaciones anteriores son:

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max}}{2}(1 - R); \quad \sigma_{mean} = \frac{\sigma_{max}}{2}(1 + R)$$

$$R = \frac{1 - A}{1 + A}; \quad A = \frac{1 - R}{1 + R}$$

2.3 VERSUS DE CURVAS DE ESFUERZO EN TIEMPO DE VIDA (S-N).

Una curva de esfuerzo en vida, también llamada curva de S-N es la representación de las pruebas de fatiga de un número de diferentes niveles de esfuerzo. Si una muestra de la prueba de un material o un componente de ingeniería es sometida a una tensión cíclica suficientemente severa, desarrollará una fisura por fatiga (o cualquier otro daño), que conduce a un fracaso total del miembro. Si la prueba se repite a un nivel de tensión superior, el número de ciclos para el fracaso será más pequeño. Dado que el número de ciclos al fracaso llegan a valores de datos muy altos suelen ser trazadas en una escala logarítmica.

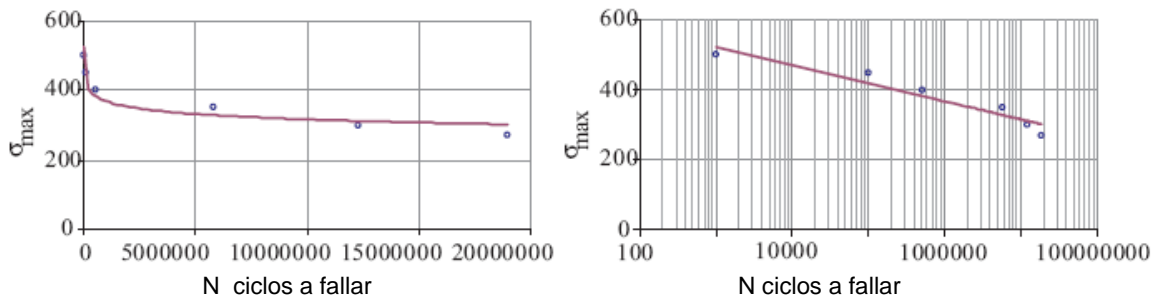


Figura 2. Gráfico de esfuerzo en vida, en un número de ciclos a la falla.

El límite de resistencia o límite de fatiga es el esfuerzo de menor amplitud por debajo del cual la fatiga producida no falla en condiciones normales. Esto ocurre con materiales como el carbono y aceros de baja aleación. El término de resistencia a la fatiga se utiliza para especificar un valor de amplitud de esfuerzo de una curva S-N de una vida particular de interés. Por lo tanto, la resistencia a la fatiga, a 105 ciclos es simplemente la amplitud de esfuerzo correspondiente a N=105.

2.4 FATIGA BAJO EL PUNTO DE VISTA DE LA MECÁNICA DE FRACTURA.

Se requiere a menudo el análisis de Ingeniería del crecimiento de la fisura, y se puede hacer utilizando el factor de la intensidad del esfuerzo K , de la mecánica de fractura:

$$K = F\sigma\sqrt{\pi a},$$

Donde a es una longitud de fisura, σ es el esfuerzo, por lo general en base al área bruta del miembro no agrietado, y F es una función adimensional en función de la geometría. El valor de F es afectado por la longitud de fisura relativa, $\alpha = a/b$, donde b es una dimensión de ancho del miembro tal que $\alpha=1$ por craqueo completo. La tasa de crecimiento de fisuras por fatiga está controlada por K . Por lo tanto, bajo una carga constante de amplitud en ciclo, la dependencia de K en α y F causa fisuras que se aceleran a medida que crecen.

2.4.1 DEFINICIONES PARA EL CRECIMIENTO DE FISURAS POR FATIGA.

Considere una fisura en crecimiento cada vez que aumenta su longitud por una cantidad Δa debido a la aplicación de un número de ciclos de ΔN . El rango de crecimiento de la fisura con los ciclos se caracterizan por la relación $\Delta a / \Delta N$, para pequeños intervalos, es decir, por la derivada da / dN .

Suponga que la carga aplicada es cíclica, con valores constantes de las cargas σ_{\min} y σ_{\max} .

Para que el crecimiento de fisuras por fatiga, sea convencional usar el intervalo de esfuerzo $\Delta\sigma$ y la relación de esfuerzos estándar R . La variable primaria que afecta la tasa de crecimiento de una fisura es el rango del esfuerzo de la intensidad de los factores. Esto puede ser calculada a partir del rango de esfuerzo como:

$$\Delta K = F\sigma\sqrt{\pi a}$$

El valor de F depende sólo de la geometría y la longitud de fisura relativa como si la carga no fuera cíclica. 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 [59], se dan por:

$$K_{max} = F\sigma_{max}\sqrt{\pi a}; \quad K_{min} = F\sigma_{min}\sqrt{\pi a}$$
$$\Delta K = K_{max} - K_{min}; \quad R = \frac{K_{max}}{K_{min}}.$$

2.4.2 DESCRIPCIÓN DE LA FATIGA DEL MATERIAL DEL COMPORTAMIENTO DE CRECIMIENTO DE FISURAS.

Para un determinado material y a condiciones establecidas, el comportamiento de crecimiento de la fisura puede ser descrito por la relación entre la tasa de crecimiento cíclico de fisuras da / dN y el rango de la intensidad de esfuerzos ΔK . Algunos datos de prueba y la curva ajustada correspondiente para un material se muestran en una gráfica log-log en la figura 3. 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:

- 1 Inicialización.
2. Propagación.
3. El rápido crecimiento inestable y falla de estructura.

En bajas tasas de crecimiento, en general la curva se convierte en paso y parece acercarse a una asíntota vertical denota ΔK_{th} , 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 la gráfica log-log como en este caso. Una relación que representa esta línea es:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m,$$

Donde C es una constante y m es la pendiente de la gráfica log-log. Esta ecuación se atribuye a P.C. Paris, el primero que lo utilizó y que fue muy influyente en la primera aplicación de la mecánica de la fractura de fatiga a principios de 1960.

En altas tasas de crecimiento, la curva puede volver a sentirse fuerte. Esto se debe al inestable rápido crecimiento de fisuras justo antes del fracaso final de la muestra de ensayo. Este comportamiento puede ocurrir cuando la zona plástica es pequeña, en cuyo caso la curva se aproxima a una asíntota correspondiente a $k_{max} = K_c$, la tenacidad de fractura del material y el espesor de interés. El rápido crecimiento inestable a altas ΔK supone en algunos casos totalmente plástico resistente. En tales casos, el uso de ΔK para esta parte de la curva es incorrecto porque las limitaciones teóricas del concepto K son superadas. Figura 3 es una representación típica de este tipo de curvas.

La constante C y m para la región intermedia, donde la ecuación se aplica, se han sugerido por Barson para diversas clases de acero. El valor de m es importante ya que indica el grado de sensibilidad de la tasa de crecimiento al esfuerzo.

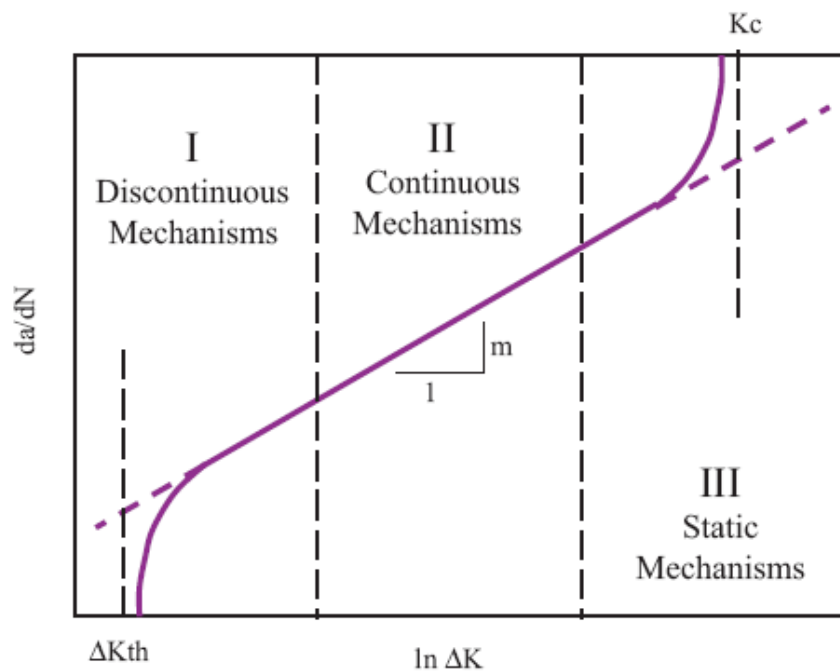


Figura 3. Gráfico de mecanismos continuos y estáticos donde muestra el crecimiento de grieta.

2.4.3 INFLUENCIA DE DIFERENTES PARÁMETROS EN EL CRECIMIENTO DE FISURAS POR FATIGA.

Efectos de $R = S_{min} / S_{max}$ en el crecimiento de fisuras por fatiga: Un aumento en la relación R de cargas cíclicas causada a tasas de crecimiento de un determinado ΔK a volverse más grandes. El efecto es generalmente más pronunciado por más materiales frágiles.

Varias relaciones empíricas se emplean para caracterizar el efecto de R en da / dN vs curvas ΔK . Una de ellas es la ecuación de Walker:

$$\overline{\Delta K} = K_{max}(1 - R)^\gamma; \quad \frac{da}{dN} = C \left(\frac{\Delta K}{(1 - R)^{1-\gamma}} \right)^m,$$

Donde γ es una constante para el material y ΔK es un equivalente de cero a la tensión ($R = 0$) la intensidad del esfuerzo que hace que la tasa de crecimiento sea igual a la real K_{max} , R combinación.

Efecto en ΔK_{TH} : La relación R generalmente tiene un fuerte efecto sobre el comportamiento del material a bajo rango del crecimiento, por lo tanto, también en el valor umbral de ΔK_{TH} . Esto ocurre incluso en metales de baja resistencia donde hay poco efecto en las tasas de crecimiento intermedio. El límite inferior de la dispersión se muestran corresponden a ΔK_{TH} de la siguiente manera:

$$\Delta K_{th} = 7.0(1 - 0.85R)MPa\sqrt{m}, \quad R \geq 0.1.$$

Basado en Barson, estas ecuaciones parecen representar una pésima estimación razonable para un amplio rango de aceros. Sin embargo, los valores más bajos de ΔK_{TH} se pueden aplicar para los aceros altamente reforzados (Tendencias similares ocurren en otras categorías de metales). **Efectos ambientales:** Consideraciones similares de inspección de las fisuras, y una necesidad similar de estimaciones de vida, donde existe el crecimiento de fisura se debe a un ambiente químico hostil, una situación denominada ambientalmente fisuración asistida. Hay varios mecanismos físicos que se producen.

En situaciones de crecimiento de las fisuras del medio ambiente durante una carga estática que no cambia, la vida del crecimiento de la fisura puede estimarse sobre la base de la mecánica de fractura, es una manera análoga a los procedimientos descritos anteriormente para el crecimiento de fisuras por fatiga

bajo cargas de amplitud constante. El parámetro control de crecimiento de las grietas es simplemente el valor estático K del factor de intensidad del esfuerzo, según lo determine de la tensión aplicada estática y la longitud de fisura actual. Las tasas de crecimiento para el material se han caracterizado por el uso de da/dt K contra la curva, donde da/dt es la tasa de crecimiento basado en el tiempo, o velocidad de crack, también se denota a.

$$\dot{a} = \frac{da}{dt} = AK^n,$$

Donde A y n son constantes del material que dependen del entorno y son afectadas por la temperatura.

2.4.4 LEYES DE LA FATIGA.

Hay dos tipos diferentes de parámetros que pueden afectar el crecimiento de fisuras por fatiga:

- Parámetros intrínsecos del material: el módulo de Young, límite de elasticidad, cíclica y metalúrgica, propiedades de los materiales, etc.
- Parámetros extrínsecos: Condiciones de la prueba, temperatura, geometría, la relación R, etc.

2.4.5 MODELOS BASADOS EN LA PROPAGACIÓN DE FISURAS.

En 1963, París y Erdogan, proponen la mayoría de Leyes de uso de los materiales de reproducción de fisuras (figura 3). En esta figura tres diferentes partes pueden ser analizadas:

Parte I: en la cual una gran influencia de la microestructura, tensiones medias y condiciones ambientales se llevan a cabo (mecanismos discontinuos).

Parte II: Ley de Paris se describe aquí. Hay una influencia de la microestructura, esfuerzos, condiciones ambientales y la geometría de la muestra (mecanismos continuos). Por último, en esta parte, los parámetros anteriores tienen una gran influencia. Broek y Schijve, propusieron una ecuación empírica para describir el crecimiento de la fisura:

$$\frac{da}{dN} = C_1 \left(\frac{\Delta K}{1 - R} \right)^3 \exp(-C_2 R),$$

Donde C1 y C2 son los parámetros característicos del material, y R es la relación de tensiones. Forman así suponiendo que el hecho de la fisura se produce cuando $K = K_c$, derivada de la ecuación, la siguiente expresión:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K^m}{(1 - R) K_c - \Delta K}.$$

Frost y Dugdale analizaron diversos materiales teniendo en cuenta consideraciones de la dimensión y los resultados experimentales:

$$\frac{da}{dN} = (P + Q\bar{\sigma}) \Delta \sigma^3 a,$$

donde P y Q son parámetros del material.

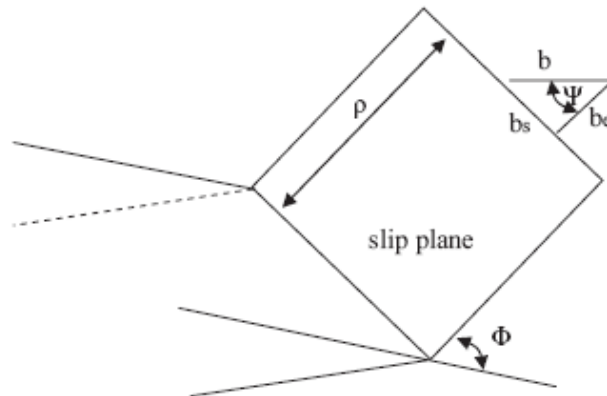


Figura 4. Gráfico de propagación de fisura.

2.4.6 MODELOS BASADOS EN LA TEORÍA DE LA DISLOCACIÓN.

Este modelo se basa en el crecimiento de la fisura cuando un movimiento de la dislocación a la cabeza de la fisura se produce.

El modelo más usado fue definido por Bilby y colaboradores, lo que supone una tensión normal. La concentración de tensiones derivadas en el crecimiento de una región plástica. Por otra parte, hay una fuerza de fricción opuesta a este movimiento. Esta situación conduce al equilibrio cuando hay un movimiento a la

cabeza de la fisura. Yokobori definió una teoría cinética para describir la tensión entre dislocaciones.

$$f_{\tau} = \tau_{p,\Phi} b_e = \frac{K_I b}{\sqrt{8\pi p}} \sin \Phi \cos \frac{\Phi}{2} \cos \psi,$$
$$f_i = -\frac{\mu b^2}{4\pi\rho} \left(\frac{1}{1-\nu} \right),$$

Donde p es la distancia desde la cabeza de la fisura a la dislocación, Φ es el ángulo formado con la dirección de propagación, f_t es la fuerza aplicada y f_i es la fuerza de la imagen.

2.4.7 MODELOS BASADOS EN EL COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL.

Este es el tercer modo de estudiar el crecimiento de la fisura. Los modelos aquí son más complejos que otros basados en las teorías expuestas antes. Pook y Frost definen la distribución de tensiones a la cabeza "crack", cuando hay una fisura de una longitud $2a$ y sujeto a una carga cíclica (de 0 a σ):

$$\frac{da}{dN} = \frac{9 K_I^2}{\pi E},$$
$$\frac{da}{dN} = \frac{9 K_I (1-\nu^2)^2}{\pi E},$$

2.5 ENFOQUE BASADO EN EL ESFUERZO A LA FATIGA.

2.5.1 CURVA ESTIMADA S-N DE UN COMPONENTE.

En el caso de que los datos experimentales S-N no estén disponibles, los métodos para estimar el comportamiento S-N de un componente se convierten en útiles y decisivos para el proceso de diseño. Grandes cantidades de datos S-N se han generado históricamente sobre la base de flexiones inversas girando completamente los ensayos en muestras estándar.

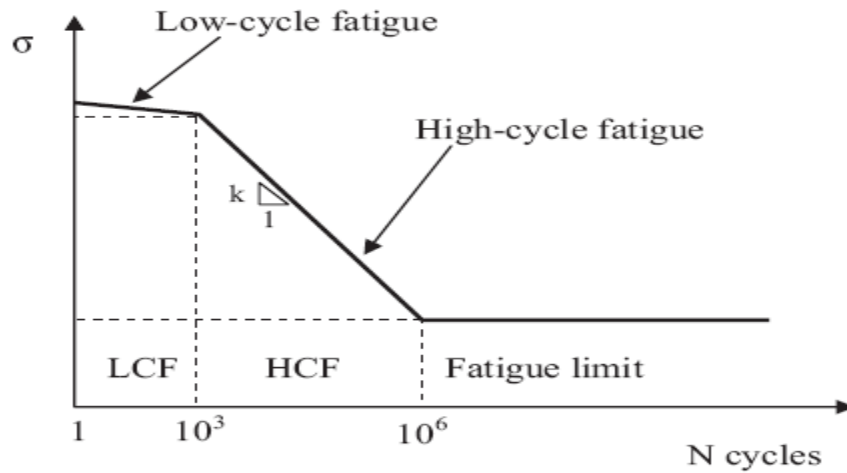


Figura 5. La curva S-N derivada de las muestras estándar con cargas puede ser construida.

Como se muestra esquemáticamente en la figura 5 hay dos segmentos lineales inclinados y un segmento horizontal en un registro típico de la curva S-logN. Los dos segmentos lineales inclinados representan las regiones de la fatiga de bajo ciclo (LCF) y la fatiga de alto ciclo (HCF), y la asíntota horizontal representa el límite de fatiga. Para las muestras hechas de los aceros, los valores de resistencia a la fatiga a 1, 103, 106 ciclos definidos en una curva S-N.

2.5.2 PRUEBA DE RESISTENCIA A LA FATIGA.

El objetivo de la prueba de resistencia a la fatiga (también llamada prueba límite de la fatiga, la prueba de resistencia, o la prueba de respuesta) es estimar una distribución estadística en una resistencia a la fatiga específica. El límite de fatiga significa que se ha estimado inicialmente, y es una prueba de resistencia a la fatiga conduciendo a un nivel de tensión un poco más alto que la media estimada. Datos de dos técnicas típicas de reducción, los métodos de Dixon-Mood y Zhang-Kececioglu, se utilizan para determinar los parámetros estadísticos de los resultados de la prueba.

2.5.3 EFECTO DEL ESFUERZO MEDIO.

Los daños por fatiga de un componente altamente correlacionado con la amplitud de tensión aplicada o aplicada al rango de tensión y también se ve influida por la tensión media. Si la tensión media es superior, las posibilidades de permanecer cerca a la tracción son más grandes, y en este momento, el fracaso puede ser producido por el parámetro estático del material. Hay muy poco o ningún efecto de la tensión media sobre la resistencia a la fatiga en la región de fatiga de bajo ciclo en el que las grandes cantidades de deformación plástica ocultan cualquier efecto beneficioso o perjudicial de una tensión media.

Los primeros modelos empíricos de Gerber, Goodman, Haigh, y [Soderberg fueron propuestos para compensar a los efectos normales de tracción de tensión media efectuada en una alta resistencia a la fatiga.

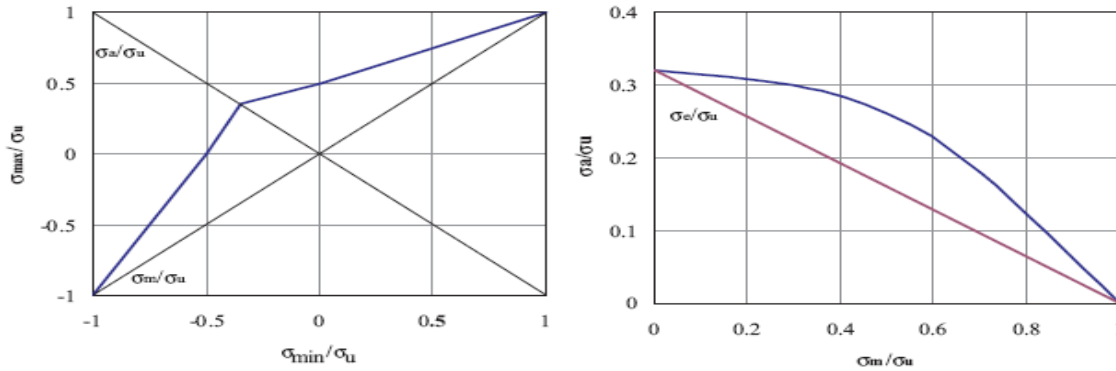


Figura 6. Representación parabólica de límite de fatiga.

En 1874, Gerber propone una representación parabólica de los datos Wöhler del límite de fatiga en una gráfica de σ_{\max}/σ_u contra σ_{\min}/σ_u como se muestra en la figura 6, donde σ_u es la falta de esfuerzo. En 1899, Goodman introdujo una línea teórica que representa los datos disponibles y la fatiga justificó el uso del criterio de impacto en la base que era fácil, sencillo de usar y proporcionan un buen ajuste a los datos. En 1917, Haigh fue el primero en representar los datos de la fatiga de latón en una gráfica σ_a contra σ_m . La figura 6 ilustra las correcciones de los argumentos Haigh, Gerber y Goodman a la media tensión. La ordenada de la gráfica de Haigh es el límite de fatiga normalizada, y la tensión media máxima se limita a la resistencia a la rotura S_u . La curva que conecta estos dos puntos en los dos ejes representa las combinaciones de las amplitudes de esfuerzos y de los medios destacados en la vida limitada a la fatiga. Matemáticamente, la parábola de Gerber y la línea de Goodman en coordenadas de Haigh pueden ser expresadas en las siguientes expresiones:

Corrección de tensión media de Gerber:

$$\sigma_e = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m^2}{\sigma_u^2}}$$

Corrección de tensión media de Goodman:

$$\sigma_e = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u}}$$

Corrección de tensión media de Soderberg: En este caso, el esfuerzo normal máximo debe ser limitado a la fuerza y rendimiento:

$$\sigma_e = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_y}}$$

Es conservador suponer que para la mayoría de los materiales dúctiles, la media de compresión normal, el esfuerzo no beneficia a la resistencia a la fatiga. Esto significa que la amplitud de tensión es totalmente reversible a la misma que la amplitud de tensión si la tensión media normal es negativa. Un diagrama de Goodman modificado para promedio normal tanto a la tracción y compresión se ilustra esquemáticamente en la grafica de Haigh en el límite de fatiga, como se muestra en figura

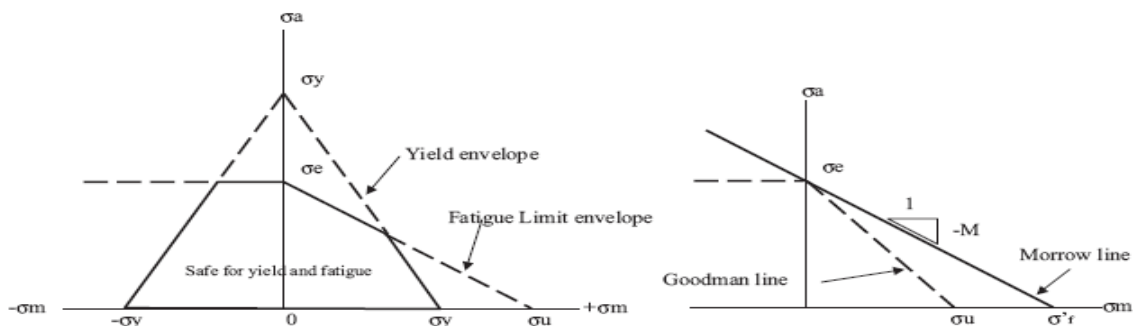


Figura 7. Región de diseño segura para limitar la fatiga.

Wilson y Haigh, introdujeron la línea de resistencia a la fluencia constante como una restricción adicional para los materiales dúctiles en la región del diseño seguro del esfuerzo, llamada la región de diseño seguro para limitar la fatiga y resistencia a la fluencia, se muestra en la figura 7.

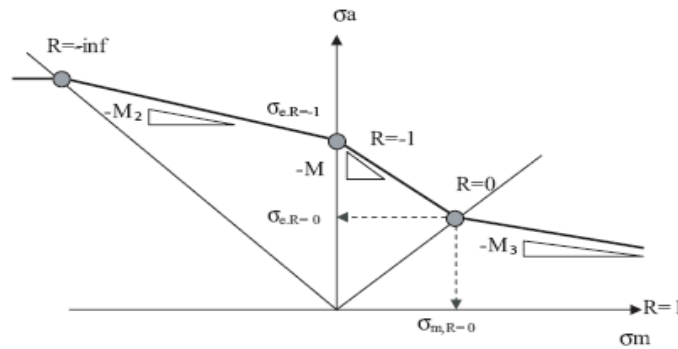


Figura 8. Diferentes concentraciones de carga de tensión.

Morrow sugiere que la amplitud de tensión además de la tensión media no puede superar el coeficiente de resistencia a la fatiga, la resistencia a la fatiga en una inversión:

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f}}$$

Para la carga de tensión relativamente pequeña, el enfoque de Morrow se considera mejor que el método de Goodman. La fórmula de corrección de la tensión media de Goodman sólo debe ser utilizado si ninguna de las propiedades de fatiga están disponibles. Para las condiciones de esfuerzo relativamente grande, un modelo empírico basado en el concepto de factor de esfuerzo de sensibilidad media fue introducido. Como se ilustra en la figura 8, se encontraron factores M a variar en diferentes concentraciones medias de esfuerzo (Radaj y Sonsino). Por ejemplo, el esfuerzo medio factor de sensibilidad para la carga de baja tensión media

$$M = \frac{\sigma_{e,R=-1} - \sigma_{e,R=0}}{\sigma_{e,R=0}}$$

Factor de la tensión media de sensibilidad para la carga con niveles bajos, niveles de compresión de esfuerzo medio denota M_2 y varía de 0 a M . El factor de esfuerzo para la sensibilidad media en promedio mayor de los niveles de tensión que caracteriza M_3 suele ser inferior a M por un factor de 3 ($M_3 = M/3$). Esto se basa en la observación empírica de la carga media alta y los pequeños presentan una mayor amplitud de los efectos dañinos que el previsto por M . También se encuentra por Schütz que el factor M para un material aumenta con una mayor

resistencia final, como se ilustra en figura 9. Si la curva línea-base S-N fue generada por pruebas de baja carga $R = 0$, es necesario para convertir cualquier desplazamiento positivo significa carga equivalente $R = 0$. Para un factor medio determinado de tensión de sensibilidad, la fórmula de conversión que se utiliza es la siguiente:

$$S_{ar,R=0} = \frac{\sigma_a + M \times S_m}{M + 1}.$$

Esta ecuación es muy popular en la predicción de objetos soldados por resistencia a la fatiga, porque solo un punto de soldadura de las pruebas de laboratorio no puede resistir ningún tipo de compresión que lleva a pandeo local de la hoja de metal. Por lo tanto, estos ejemplares suelen ser objeto de $R = 0$ de carga para la generación de una base de referencia de la curva S-N. Cualquier esfuerzo medio de corte puede considerarse positivo porque los signos de corte se eligen arbitrariamente.

Los datos experimentales indican que la fatiga del esfuerzo medio de corte tiene poco efecto sobre la resistencia a la fatiga sin muescas de los miembros bajo torsión. Cuando plantea un efecto significativo de la tensión están presentes en una componente sometida a cargas de torsión, el estado de esfuerzo en las zonas de alta concentración de tensiones se desvía de corte puro. Por lo tanto, los resultados experimentales bajo dichas condiciones presentan un corte de media tensión. Se recomienda utilizar la ecuación de Goodman.

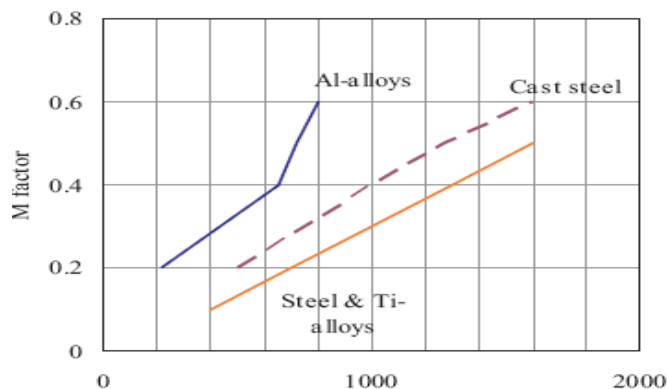


Figura 9. Observación empírica de la carga media de los aceros.

2.5.4 TENDENCIAS EN LAS CURVAS S-N.

Las curvas S-N son características para cada material, y se ven afectadas por una variedad de factores. En este entorno de subsección, frecuencia de los ciclos, microestructura, las tensiones residuales y la superficie, estos efectos serán estudiados. Ahora, algunos de estos aspectos son analizados para conocer la influencia en las tendencias de las curvas S-N, cuando uno o más de estos aspectos se presentan en los ensayos de materiales.

2.5.5 EFECTOS DEL MEDIO AMBIENTE Y LA FRECUENCIA DE LOS CICLOS.

Ambientes químicos hostiles pueden acelerar el inicio y crecimiento de fisuras de fatiga. Un mecanismo es el desarrollo de pozos de la corrosión por las reacciones químicas y disolución de material en la punta de la fisura. Los Gases en el aire pueden actuar como un ambiente hostil, sobre todo a altas temperaturas. Varían la vida de fatiga con frecuencia de los ciclos en tales situaciones, la vida en ciclos es más corto para las frecuencias es más lento (ver figura 10).

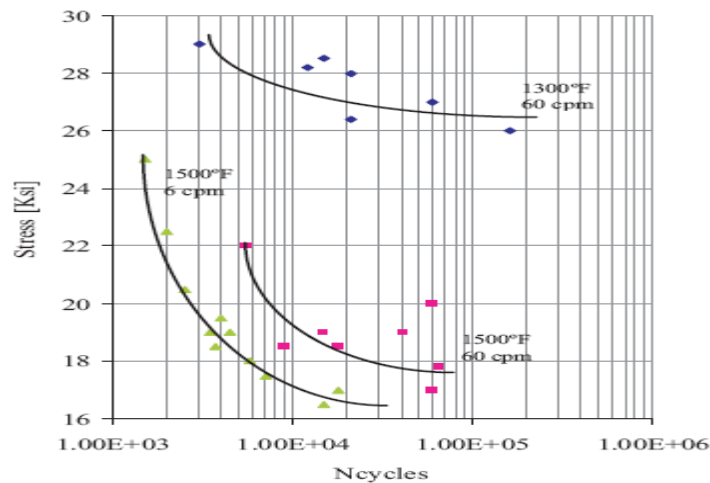


Figura 10. Vida de fatiga es corto en ciclos y para frecuencias es más lento.

2.5.6 EFECTOS DE LA MICROESTRUCTURA.

Un cambio en la microestructura o condición de la superficie tiene potencial de alterar la curva S-N, sobre todo en larga vida de la fatiga. La fatiga en la resistencia a metales es generalmente mejorada reduciendo el tamaño de las inclusiones y vacíos. La microestructura de los materiales varía a menudo con la dirección, como el alargamiento de los granos e inclusiones en la dirección de laminación de planchas de metal. La resistencia a la fatiga puede ser menor en las direcciones donde el esfuerzo es normal a la dirección a lo largo de la estructura de dichas microestructuras y alargadas o en capas.

2.5.7 TENSION BASADA A LA FATIGA.

En la sección anterior, se presentaron el análisis y diseño de componentes con resistencia a la fatiga de tensión basada en técnicas de predicción. Este acercamiento al análisis de fatiga de los componentes de las obras para situaciones en las que sólo las tensiones elásticas y las tensiones están presentes. Estos componentes pueden parecer haber sido nominalmente tensiones elásticas cíclicas, pero los cortes, soldaduras, u otras concentraciones de tensión presentes en el componente pueden provocar la deformación plástica local cíclica. En estas condiciones, otro enfoque que utiliza las tensiones locales como el parámetro de la fatiga que gobierna (la variedad local-método de la vida) fue desarrollada a finales de 1950 y se ha demostrado ser más eficaz en la predicción de la resistencia a la fatiga de un componente. El método local de vida se basa en el supuesto de que la vida dedicada a la nucleación y crecimiento de las fisuras pequeñas de un componente se puede aproximar por un laboratorio suave de una muestra bajo la misma deformación cíclica en el sitio de iniciación en sitio (ver figura 11).

El método local de vida se puede utilizar de manera proactiva para un componente durante el diseño inicial de sus etapas. El método local de vida es preferible si la historia de carga es irregular o aleatoria y donde la tensión media y los efectos de secuencia de la carga se cree que son de importancia. Este método también proporciona un enfoque racional para diferenciar la fatiga de alto ciclo y de los regímenes de la fatiga de bajo ciclo y que incluya la plasticidad y la media de la muesca del efecto de la tensión sobre la vida de la fatiga.

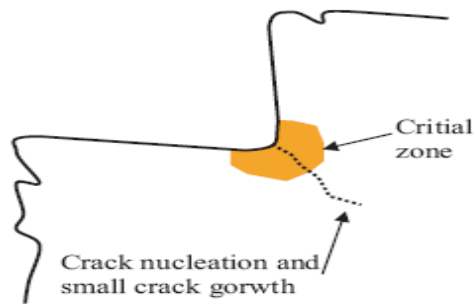


Figura 11. Método local de vida.

2.5.8 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TENSIÓN-DEFORMACIÓN MONÓTONA Y CÍCLICA DE LOS MATERIALES.

2.5.8.1 PROPIEDADES MECÁNICAS MONÓTONAS.

Los siguientes parámetros se determinan, a partir de ensayos de tracción monótona. No es posible explicar estas propiedades sin explicar primero el significado de la curva (véase la figura 12, derecha).

En lugar de las dimensiones originales de la muestra, el esfuerzo real y la deformación real se definen mediante el área de sección transversal (A) y longitud (l) instantáneas. Se expresa como sigue:

$$\sigma = \frac{P}{A} \rightarrow \sigma = S(1 + e)$$

$$\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \rightarrow \ln(1 + e).$$

Estas relaciones son válidas sólo hasta el inicio de la estricción de la muestra.

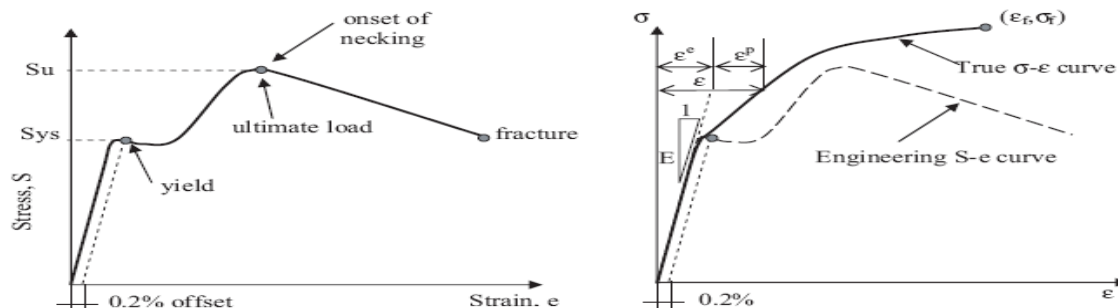


Figura 12. Gráfico de propiedades mecánicas monótonas.

El esfuerzo de ingeniería (S) y la tensión de ingeniería (e) son la relación que está determinada por las mono-pruebas de tensión tónica aplicadas a muestras lisas, cilíndricas. Los esfuerzos de Ingeniería y las tensiones se definen por medio del área original de la sección transversal (A_0) y la longitud original (l_0) de la prueba.

Muestra:

$$S = \frac{P}{A_0} ; e = \frac{\Delta l}{l_0}.$$

Cuatro parámetros que pueden medirse directamente de la relación esfuerzo-deformación de ingeniería: el rendimiento de la fuerza, resistencia a la tracción, porcentaje de elongación, y la reducción de área. Una curva típica de ingeniería de esfuerzo-deformación se representa en la figura 12 (a la izquierda). El rendimiento de la fuerza representa el límite de comportamiento elástico y se define normalmente como el esfuerzo asociado 0.2% con deformación plástica. La resistencia a la tracción es la capacidad de carga máxima de la carga de una muestra.

Ambos porcentaje de elongación y reducción de la superficie se miden mediante el ensamblaje de una fractura de tensión de muestra juntos y midiendo la longitud final (LF) y la zona final de la sección transversal (A_f). Estos dos parámetros son la medida de la ductilidad del metal antes de la fractura y se definen como sigue:

2.5.9 MATERIAL DE PROPIEDADES CÍCLICAS.

La respuesta cíclica estable tensión-deformación es el ciclo de histéresis y se identifica en la figura 13. El ciclo de histéresis, definida por la deformación total y el rango de tensión total representa el trabajo más elástico de plástico en un material sometido a carga y descarga. Por lo general, el ciclo de histéresis estabilizado se toma en medio de la resistencia a la fatiga.

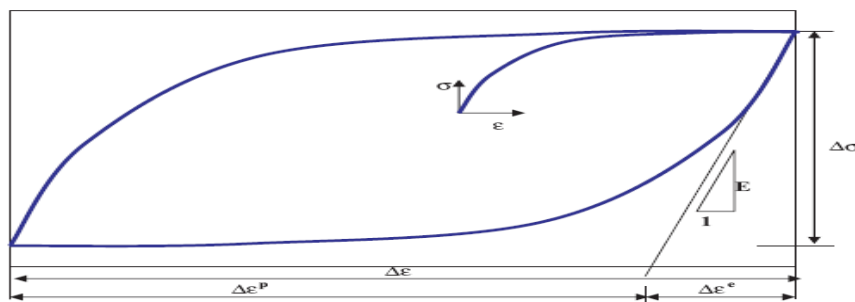


Figura 13. Ciclo de histéresis.

Las propiedades se determinan a partir de los cíclicos en el estado estacionario de la tensión y la respuesta de esfuerzo. También establece que el material debe tener un comportamiento simétrico de tracción y compresión.

La ecuación de ciclo de histéresis se define por:

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{1/n'}$$

La ecuación ha sido ampliamente utilizada para la descripción y el seguimiento del comportamiento tensión-deformación en virtud de las distintas circunstancias de la amplitud de carga.

La curva de tensión-deformación cíclica refleja la resistencia de un material a la deformación cíclica y puede ser diferente de la curva de tensión-deformación monótona. Por lo general, los metales con una alta monotónica y exponente de endurecimiento por deformación ($n > 0.2$) se endurece mientras que aquellos con una tensión de baja monotónica y exponente de endurecimiento ($n < 0.1$) en función del ciclo se ablandará. Una regla de oro (Bannantine) es que el material se endurece y si el material se ablanda. Las propiedades que se determinan a partir de ciclos de histéresis estabilizados y los datos de vida de la tensión se definen en la tabla 3.3. Sobre la base de la propuesta de Morrow, la relación de la amplitud de deformación total y la resistencia a la fatiga en inversiones al fracaso puede expresarse de la siguiente forma:

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c$$

2.5.10 MÉTODOS DE CORRECCIÓN DE LA TENSIÓN MEDIA.

Aquí los métodos de corrección de la tensión media se estudian. En el diseño para la durabilidad, la presencia de un cero significa que el esfuerzo normal puede influir en el comportamiento de fatiga de materiales, porque una tensión o una tensión media de compresión normal se ha demostrado ser responsable de la aceleración o desacelerar el crecimiento de la fisura y de iniciación (como en el enfoque de la tensión a la fatiga. Muchos modelos han sido propuestos para cuantificar el efecto de tensiones medias en el comportamiento de fatiga.

Los modelos comúnmente utilizados en el sector de los vehículos de tierra son los de Morrow y por Smith, Watson, y Topper.

Método de corrección de la tensión media de Morrow: Morrow ha propuesto las siguientes relaciones:

$$\epsilon_a = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c.$$

Esta ecuación implica que la presión promedio normal puede ser tomada en cuenta mediante la modificación de la parte elástica de la curva de tensión-vida por el esfuerzo medio.

Esta corrección se utiliza para los aceros y es utilizado con un éxito considerable en el régimen de larga duración cuando la amplitud de deformación plástica es de poca importancia

Modelo Smith-Watson-Topper (SWT): Smith, Watson, y Topper, presentaron un método que asume que la cantidad de daños por fatiga en un ciclo está determinado por un máximo donde es la máxima tensión de tracción y una amplitud de tensión. Además, el SWT-parámetro es simplemente una declaración de que un máximo de esfuerzo para una prueba totalmente invertido es igual a un máximo durante una media.

Prueba de Esfuerzo. Por lo tanto, este concepto se puede generalizar y se expresa en la siguiente forma matemática (Langlais y Vogel,) producir un daño equivalente a la fatiga por el parámetro de SWT. El parámetro SWT predice la ausencia de daños por fatiga si la tensión de tracción máxima se convierte en cero y negativos. La fórmula SWT se ha aplicado con éxito a la fundición gris, templada, aceros al carbono y aceros microaleados.

Información tomada del artículo. A statistical fatigue model covering the tension and compression wöhler fields and allowing damage accumulation.

2.6 INFORMACIÓN GENERAL.

Desde el punto de vista físico, el fallo por fatiga (fractura) es el resultado de la acumulación de la tensión plástica. Sin embargo, los procesos anteriores de la fractura a la fatiga son demasiado complicados y, por consiguiente, no es posible describir las curvas de fatiga utilizando sólo las concepciones meramente físicas. Por el otro lado, todas las propiedades de fatiga asociada a las curvas de fatiga (limitar la fatiga, la pendiente de la curva de la fatiga en el rango de vida finita, etc) no se definen estrictamente las cantidades físicas, pero sólo propiedades de ingeniería de materiales. El resultado de estos dos hechos es sólo un método de descripción fenomenológico de las curvas de fatiga y parece que un enfoque puramente físico no tendrá éxito para los próximos años.

Todas las funciones importantes para la descripción de las curvas de la fatiga se pueden dividir en varios grupos de acuerdo con las formas geométricas de sus gráficos. No se prestará especial atención a los modelos clásicos triviales de las curvas de fatiga que cubren las regiones de la vida finita y permanente del límite de la fatiga. Para tal fin es utilizada una línea quebrada recta con dos brazos (oblicuos y horizontales).

2.6.1 Dos fases de la fatiga.

La vida de fatiga de un componente puede ser dividida en dos fases: inicio de grietas y propagación de la grieta. El inicio de fase comienza cuando el componente primero entra a servicio en algún ambiente de esfuerzo cíclico, como perforación rotaria. Ésta termina cuando se ha formado una grieta de fatiga de tamaño suficiente de modo que el crecimiento adicional de la grieta es relativamente independiente de la geometría del componente y el terminado superficial. La fase de propagación es el período de servicio que sigue, durante el cual la grieta, a menos que sea detectada por inspección, crece hasta que el componente falla por fugas, fractura quebradiza o deformación bruta del plástico. La duración relativa de las dos fases puede variar ampliamente dependiendo de las circunstancias del servicio. El terminado superficial es muy importante en amplitudes de bajo esfuerzo, y bajo estas condiciones, la mayoría de la vida de fatiga del componente es gastado en el inicio de la grieta. El daño de fatiga es acumulativo desde un trabajo al siguiente, así que, cuando un diseñador selecciona un componente, éste probablemente habrá acumulado algún daño anterior.

2.6.2 Complejidad de la fatiga.

El mecanismo de la fatiga es afectado por las propiedades del material, las cargas y varios otros factores. Esta complejidad, además de la falta de conocimiento consciente acerca de la cantidad de algún daño anterior a la fatiga, hace prácticamente imposible la predicción absoluta de vida de fatiga. Además, los modelos de fatiga existentes se apoyan en los datos experimentales para calcular la vida de fatiga, pero esta información raramente está disponible para los componentes de la sarta de perforación.

2.6.3 Comparación relativa de la vida de fatiga.

Los factores de arriba hacen que las vidas de fatiga sean determinadas por cálculos tan imprecisos que éstos no son útiles para predecir la vida de fatiga absoluta en los componentes de la sarta de perforación. No obstante, los resultados de estos modelos son muy útiles para comparar la resistencia a fatiga de las alternativas de diseño cuando factores de incógnita son mantenidos constantes y sólo los factores conocidos son variados.

2.6.4 Diseño comparativo u “otras cosas iguales”.

Debido a los temas discutidos antes, hacer un estimado preciso por adelantado de la vida total de fatiga en ciclos para la falla no es práctico en el diseño simplemente no conoce todas las variables necesarias para integrarlas dentro de las fórmulas. Aunque, él o ella conocen muchas de ellas, y lo que se conoce puede formar la base para la comparación diario de la sarta de perforación. El diseño introducido en este artículo es denominado diseño comparativo. El trabajo del diseñador de la sarta de perforación es esencialmente escoger entre alternativas de competencia para equilibrar muchas situaciones, sólo uno de los cuales es fatiga. Así, el enfoque del diseño comparativo es para expresar cuantitativamente el desempeño cuantitativo entre las alternativas. El enfoque relativo de la fatiga de las alternativas es que el diseñador probablemente estará considerando, con base sólo en variables que conocerá o podrá asumir con algo de certidumbre.

Este enfoque, mientras éste no puede decirle a él o a ella cuánto tiempo durará un componente en un conjunto de circunstancias determinadas (porque muchos factores todavía son desconocidos), dará, en términos cuantitativos, cómo una alternativa bajo consideración que se compara con otras, otras cosas iguales. De

esta manera, el desempeño de la fatiga relativa se convierte en uno de los muchos criterios sobre los cuales una alternativa de diseño es preferida sobre otra, muy parecido al desempeño relativo de la hidráulica en algunas circunstancias podría causar que un diseñador escoja tubería de perforación de 6-5/8 pulgadas sobre la tubería de 5 pulgadas.

Para proporcionar los datos necesitados para este enfoque, usamos el modelo Forman para calcular la vida de fatiga normalizada para una variedad de casos, variando los factores que el diseñador conocerá, y manteniendo constante las variables que él o ella probablemente no conocerá.

Expresamos desempeño de fatiga relativa con dos índices dimensionales, Índice de Curvatura para tubos de tubería de perforación, y el Índice de Estabilidad para los componentes del aparejo de fondo (BHA).

2.6.5 Vida de fatiga normalizada.

La vida de fatiga determinada por el modelo de crecimiento de grieta de Forman para un componente determinado en un conjunto dado de circunstancias, lo denominamos vida de fatiga normalizada. Ésta es realmente el período, expresado en ciclos de esfuerzos, que se requiere para crecimiento de una grieta de fatiga existente derivada de un tamaño asumido para falla. Nos referimos a esto como normalizado en el sentido de que cuando calculamos la vida de propagación de la grieta para un conjunto diferente de circunstancias para compararlas en contra del primer conjunto, todos los factores que el diseñador probablemente no conozca son mantenidos constantes para ambos cálculos, de modo que los dos conjuntos de circunstancias variarán sólo en maneras que deberán ser conocidos para el diseñador. Por ejemplo, considere una unión para rotación de tubería de perforación en una pata de perro. Varios ingresos del modelo de Forman son probablemente conocidos por el diseñador, fácilmente calculado de las cantidades conocidas, o podrían ser asumidos con certeza razonable. Estos incluyen:

Esfuerzo axial

Esfuerzo de flexión

Relación de esfuerzo (R)

Factor de intensidad de esfuerzo mínimo (K_{min})

Factor de intensidad de esfuerzo máximo (K_{max})

Rango de de factor de intensidad de esfuerzo (K)

Factor de corrección del componente de geometría (F)

Factor de corrección de la forma de la grieta (Q)

Tamaño máximo de una grieta existente (a)

Otros factores importantes, no obstante, no serán conocidos con certeza razonable, incluyendo:

Coeficiente de crecimiento de la grieta de Forman (C).

Exponente de crecimiento de la grieta de Forman (n).

Factor de intensidad del esfuerzo crítico (KIC).

Efectos de corrosividad del lodo sobre la velocidad de crecimiento de la grieta.

Al correr una serie de cálculos para vida de fatiga normalizada bajo una variedad de circunstancias, al variar aquellos factores en el primer grupo y al mantener constante aquellos en el segundo, es posible crear comparaciones con significado entre las alternativas de diseño. La tarea remanente es expresar los resultados en términos tanto entendibles como utilizables por el diseñador de la sarta de perforación.

2.7 Índice de Métodos en el diseño de Sarta de Perforación.

2.7.1 Índice de Curvatura (CI).

Para tubos de tubería de perforación, transferir los resultados de cálculo en términos utilizables se realiza con las gráficas del Índice de Curvatura (CI), los ejemplos de estos se muestran en las figuras 14 y 15.

Debido a que éste es simplemente una remanifestación de la vida de fatiga de Forman derivado de un conjunto de circunstancias hacia otra, el CI habilita al diseñador para realizar comparaciones de vida de fatiga cuantitativa entre dos o más conjuntos de circunstancias. Cualesquiera de los dos conjuntos de circunstancias con el mismo CI se esperaría que tuvieran el mismo índice de daño por fatiga por ciclo, y la relación de los Índices de Curvatura representa el grado en que los conjuntos de circunstancias variarán uno del otro, *igual a variables incógnitas*. Por ejemplo, la figura 14 muestra que la tubería clase premium grado S de 5 pulgadas, 19,50 ppf en una pata de perro de siete grados/100 pie con

210,000 libras de tensión es equivalente a rotar la misma tubería en una pata de perro de tres grados / 100 pie con 440,000 de libras de tensión. Además, ambos harían crecer las grietas de fatiga existentes al doble de velocidad de la tubería clase premium, grado G, de 5-7/8 de pulgada, 23.40 ppf en una pata de perro de cinco grados con 215,000 libras de tensión debajo (figura 15).

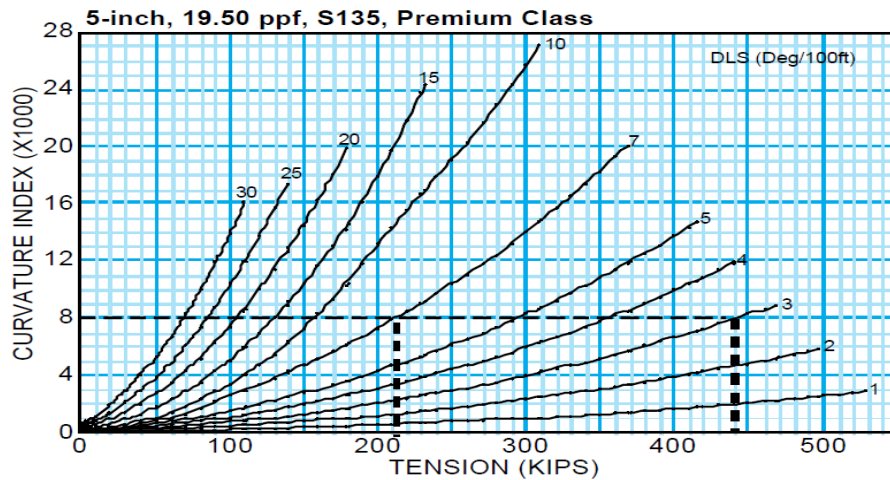


Figura 14 – Índice de Curvatura para tubería de perforación clase premium, de 5 pulgadas, 19.50 ppf, S135.

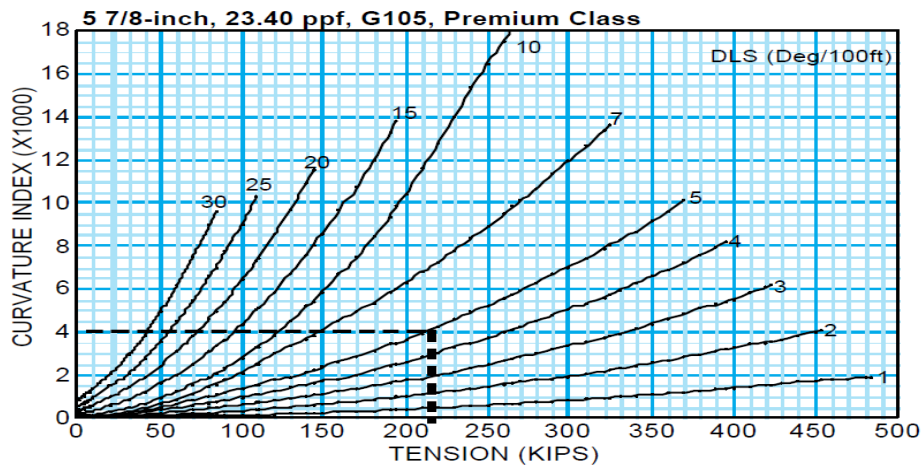


Figura 15 – Índice de Curvatura para tubería de perforación clase premium, de 5 7/8 pulgadas, 23.40 ppf, G105.

2.7.2 Índice de Estabilidad (SI).

Para los componentes del aparejo de fondo tal como lastrabarrenas y HWDP, el problema es más complicado. Primero, asumimos que la fatiga ocurrirá en la conexión del aparejo, así que el cálculo debe ser específico para la conexión. Pero el esfuerzo y deformación de la conexión será proporcional al momento de flexión desde la deflexión de columna lateral, la que será determinada por las propiedades de la columna y el agujero. Además, la geometría de una conexión rotaria con resaltos es considerablemente más compleja que para un tubo de tubería de perforación, y la situación de carga también es más compleja ya que el torque de enroscado se involucra. Por lo tanto, el método para calcular la vida de fatiga normalizada en las conexiones del aparejo, según se describe en el Apéndice A, es considerablemente diferente a aquél que para los tubos de tubería de perforación. Una vez calculada, la vida de fatiga normalizada es usada bastante de la misma manera para determinar el Índice de Estabilidad como se muestra en la ecuación 4.

$$SI = \frac{5 \times 10^8}{\text{Número de ciclos a fallar}}$$

La presentación del Índice de Estabilidad se muestra en la figura 16. El diseñador utilizará el SI casi de la misma manera que la CI, que es para comparar una alternativa de diseño con otra.

El propósito de las ecuaciones sirve para reducir los números a tamaños más manejables, y para disuadir a los diseñadores de utilizar vida de probación de grieta normalizada como una medida total de cuánto tiempo durará un componente en servicio.

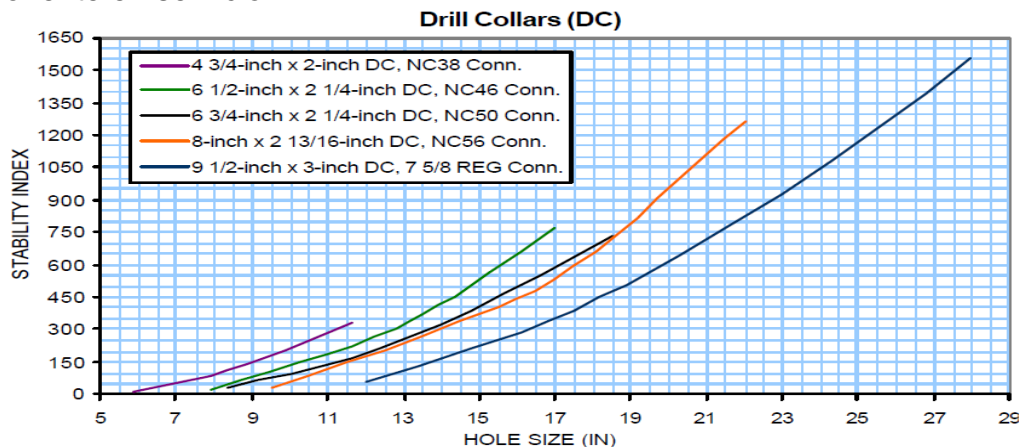


Figura 16. Índice de Estabilidad para varios de los componentes del aparejo de fondo (BHA).

2.7.3 Disponibilidad de otras curvas.

Obviamente, el esfuerzo de cálculo para determinar el Índice de Curvatura y el Índice de Estabilidad para un número de alternativas de diseño es sustancial. Por lo tanto, hemos pre-calculado el Índice de Curvatura cubriendo 183 casos para tubería de perforación de peso normal y pared espesa, y el Índice de Estabilidad para 7 casos comunes de componentes del BHA.

2.7.4 Uso avanzado del concepto.

No se requieren más que las gráficas y ninguna otra herramienta para que el diseñador manualmente aplique los métodos de diseño de fatiga comparativa. Sin embargo, suponga que nuestro diseñador conoce las constantes de material necesarias, y requeridas para rastrear la propagación de la grieta de fatiga de acuerdo al método propuesto por Dale. Como señaló Dale, la velocidad de crecimiento de la grieta sobre cualquier componente en la sarta de perforación variará ampliamente con las características del hoyo, la ubicación del componente en cualquier momento, y el tiempo y velocidad a la cual éste rota en cada una de las ubicaciones. Por lo tanto, la identidad del componente debe ser mantenida y la historia de fatiga acumulada por el componente o grupo de componentes ya que cada uno pasa a través de varias curvas y secciones rectas en cada uno de los hoyos. Poner sentido a todo esto parece intimidantemente complicado, aun así los programas de software que pueden lograrlo están disponibles. Los medios para mantener la identidad en estos programas pueden ser tan simples como ingresar manualmente un número de serie del componente. Este nivel de atención requerirá más involucramiento y esfuerzo que sólo utilizar las gráficas de diseño comparativas de arriba, pero podría ser justificado en casos críticos.

2.7.5 Precaución: otras cosas no siempre son iguales.

El inicio de la grieta por fatiga con frecuencia requerirá más tiempo que la propagación de la grieta, y la geometría y terminado superficial de cualquier componente pueden jugar enormes papeles durante el inicio de la grieta. Al lector se le recuerda que el enfoque dado en este artículo es mucho más simplificado en el sentido que éste sólo se aplica durante la fase de propagación. Aún así, de las muchas elecciones que hace nuestro diseñador afectarán significativamente el comportamiento de la fatiga durante la fase de inicio. Aunque, las decisiones del diseñador ayudarán a determinar si todas aquellas grietas que están siendo analizadas por medio del modelo Forman permanecen puramente hipotéticas o se

convierten en demasiado reales. Lo que estas elecciones de diseño tendrán en común es que las alternativas diferirán en alguna manera geométrica conocida y predecible. Por ejemplo, la referencia 6 muestra que las conexiones regulares de 6 5/8 en lastrabarrenas de 8 pulgadas formarán grietas y fallarán más rápidamente que lo que lo harán las conexiones NC56 que operan bajo condiciones idénticas. La razón citada es que la geometría del regular de 6 5/8 promueve el inicio de grieta más fácilmente que la NC56, debido a las diferencias en la forma del enroscado y la cuerda. Aunque una grieta, una vez formada, crecerá aproximadamente tan rápidamente en cualquier conexión, la NC56 es una elección mucho mejor porque ésta se desempeña mejor en la fase de inicio de grieta. La referencia 6 usa el mismo enfoque para establecer las dimensiones óptimas para ranurados de alivio de esfuerzo en los pasadores (pins) del aparejo. Ya que la geometría del componente sólo se presenta prominentemente durante la fase de inicio un enfoque de S-N denominado Modelo de vida de Deformación de Morrow, descrito es usado para comparar los componentes que tienen diferentes geometrías.

Índice de Curvatura.

Considere la figura 17, que muestra una tubería de perforación rotando en una pata de perro mientras éste está en tensión simultánea. El Índice de Curvatura es determinado calculando primero el esfuerzo en la fibra externa del tubo de tubería de perforación causado por flexión (σ_b) mientras éste rota en una pata de perro. Este cálculo se basa en parte en el trabajo de Arthur Lubinski. Las ecuaciones A.9 y A.10 fueron obtenidas del trabajo de Lubinski; no obstante, las formas de estas ecuaciones fueron derivadas para ajustarse a esta aplicación. La ecuación A.9 se usa para probar si el contacto está ocurriendo o no, entre la tubería de perforación y la pared del agujero para una curvatura de agujero determinada y la carga tensil axial. La ecuación A.10 se usa para calcular M_o para casos donde el contacto con la pared no ocurre entre la tubería de perforación y la pared del agujero. En el caso de contacto con la pared, la ecuación A.10 no aplica. Por lo tanto, fue necesario derivar la ecuación A.11 para manejar el caso de contacto de pared. Esta derivación fue asistida por el trabajo de Wu, quien resolvió un problema similar para tubería bajo cargas compresivas. Ya que incluir las derivaciones de estas ecuaciones aquí podría confundir al lector quien está tratando de seguir el cálculo del Índice de Curvatura, las derivaciones para las ecuaciones A.9, A.10 y A.11 son dadas por separado en el Apéndice B.

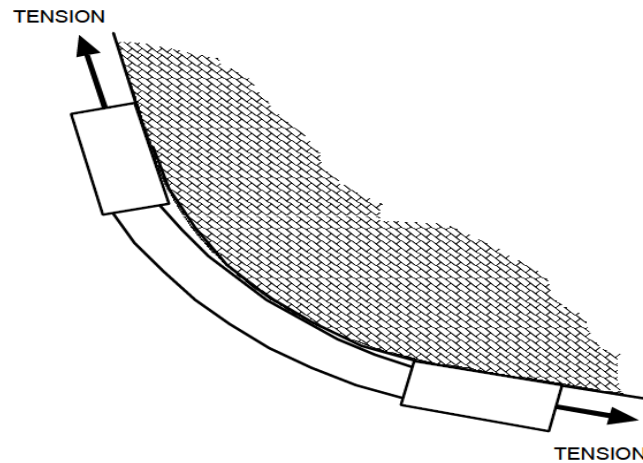


Figura 17. Unión de tubería de perforación en una sección curvada del agujero.

La ecuación de crecimiento de grieta de Forman (A.1), fue usada para determinar el Índice de Curvatura y el Índice de Estabilidad. La ecuación relaciona la velocidad de crecimiento de la grieta (da/dN) al rango del factor de intensidad del esfuerzo (K). La ecuación es una fórmula empírica en donde los valores para las constantes “C”, “KIC” y “n” son recalculadas a partir de mediciones experimentales de da/dN vs. K para el material en cuestión. La fórmula puede ser usada para predecir el incremento de crecimiento de una grieta existente en el material sujeto desde un tamaño determinado para la falla.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K^n}{(1-R)K_{IC} - \Delta K} \quad (\text{for } \Delta K > 0) \dots\dots\dots (A.1)$$

$$\frac{da}{dN} = 0 \quad (\text{for } \Delta K \leq 0)$$

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (\text{for } R > 0) \dots\dots\dots (A.2)$$

$$\Delta K = K_{\max} \quad (\text{for } R \leq 0) \dots\dots\dots (A.3)$$

$$R = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\sigma_a + \sigma_b} \dots\dots\dots (A.4)$$

$$K_{\max} = (\sigma_a + \sigma_b) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F \dots\dots\dots (A.5)$$

$$K_{\min} = (\sigma_a - \sigma_b) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F \dots\dots\dots (A.6)$$

Donde:

- da/dN = Velocidad de crecimiento de la grieta, (in/ciclo).
- ΔK = rango del factor de intensidad del esfuerzo.
- Kmax = factor máximo de intensidad de esfuerzo.
- Kmin = factor mínimo de intensidad de esfuerzo.
- KIC = factor de intensidad de esfuerzo crítico (propiedad del material).
- R = relación de esfuerzo.
- C = coeficiente de la ecuación de Forman (determinado empíricamente).
- n = exponente de la ecuación de Forman (determinado empíricamente).
- a = profundidad de la grieta, (in).
- σ_a = esfuerzo axial (ksi).
- σ_b = esfuerzo de flexión (ksi).
- F = factor de corrección de la geometría del componente.
- Q = factor de corrección de la forma de la grieta.

Cuando se usa el modelo de crecimiento de grieta de Forman para calcular la velocidad de crecimiento de grieta, un tamaño inicial de grieta es asumido y usado para calcular el rango de factor de intensidad del esfuerzo para el primer ciclo. El incremento de crecimiento de grieta para ese ciclo es calculado, y el incremento de crecimiento de grieta es añadida para el tamaño de grieta anterior para obtener el nuevo tamaño de grieta. Este proceso es repetido hasta que la grieta ha crecido lo suficiente de modo que el factor de intensidad de esfuerzo crítico sea alcanzado.

$$\sigma_b = \frac{D}{2I} M_o \dots\dots\dots (A.7)$$

Calcular C:

$$c = \frac{1}{R_c} \dots\dots\dots (A.8)$$

Calcular Cc:

$$c_c = \frac{D_{II} - D}{L^2} \frac{(KL) \sinh(KL)}{2 - 2 \cosh(KL) + (KL) \sinh(KL)} + \frac{w_b L^2 \sin(\theta)}{EI (KL)^2} \dots\dots\dots (A.9)$$

Si c es menor que C_c , entonces la tubería no contacta la pared del agujero y M_o es determinado por la ecuación A.10. Si c es mayor que o igual a C_c , entonces el tubo sí contacta la pared del agujero y M_o es determinado por la ecuación A.11.

$$M_o = \frac{KL}{\tanh(KL)} \left[E I c - \frac{w_b L^2 \sin(\theta)}{(KL)^2} \right] + \frac{w_b L^2 \sin(\theta)}{(KL)^2} \dots\dots\dots (A.10)$$

$$M_o = \frac{w_b L^2 \sin(\theta)}{(KL)^2} + \frac{(KL/2)}{\tanh(KL/2)} \left[E I c - \frac{w_b L^2 \sin(\theta)}{(KL)^2} \right] + \frac{2 \cdot (KL/2)^2 \tanh(KL/2)}{(KL/2) - \tanh(KL/2)} \frac{E I \cdot r_c}{L^2} \dots\dots\dots (A.11)$$

$$K = \sqrt{\frac{T}{EI}} \dots\dots\dots (A.12)$$

$$r_c = \frac{D_{IJ} - D}{2} \dots\dots\dots (A.13)$$

A continuación, el esfuerzo axial en el tubo de la tubería de perforación es calculado.

$$\sigma_a = \frac{T}{A} \dots\dots\dots (A.14)$$

$$A = 0.7854 (D^2 - d^2) \dots\dots\dots (A.15)$$

Los esfuerzos axial y de flexión calculados son ingresados dentro del modelo de crecimiento de grieta de Forman para obtener el número de ciclos para la falla. El número de ciclos para la falla es luego convertido a Índice de Curvatura usando la ecuación A.16.

$$CI = \frac{5 \times 10^8}{\text{Número de ciclos a fallar}} \dots\dots\dots (A.16)$$

Nomenclatura para los cálculos de CI:

- A = área de sección transversal del tubo de la tubería de perforación (in²)
- CI = Índice de Curvatura
- D = diámetro externo del tubo de la tubería de perforación, (in)
- DTJ = diámetro externo de la unión de herramientas de la tubería de perforación (in)

d	= diámetro interno del tubo de la tubería de perforación, (in)
E	= módulo de Young, (psi)
I	= momento de inercia del tubo de la tubería de perforación, (in ⁴)
L	= mitad de la longitud del tubo de la tubería de perforación, (in)
Mo	= momento de flexión sobre el tubo de la tubería de perforación en la unión de herramientas, (in-lbs)
θ	= ángulo de promedio de inclinación a través del tubo de tubería de perforación, (radianes)
T	= carga axial tensil, (lbs)
Rc	= radio de curvatura de la pared del agujero, (in)
c	= curvatura de la pared del agujero, (in ⁻¹)
cc	= curvatura crítica de la pared del agujero, ((curvatura de la pared del agujero requerida para la mitad del tubo de tubería de perforación para justo contactar la pared del agujero para una carga tensil axial determinada)
Wb	= peso flotado por longitud de unidad, (lb/in)
σ_a	= esfuerzo axial (psi)
σ_b	= esfuerzo de flexión (psi)

Índice de Estabilidad (SI).

La columna del BHA pandeada es mostrada en la figura 18. Se asume que se ha aplicado suficiente fuerza compresiva a la columna para forzarla dentro del contacto con la pared del agujero. Las ubicaciones de las grietas de fatiga (si ocurren) estarán en los puntos de más alto esfuerzo y deformación en una conexión enroscada, y ocurrirá en la raíz de algún pin o cuerda de caja.

Para evaluar la vida de fatiga de la conexión bajo estas circunstancias, es necesario seleccionar una conexión específica y colocarla en una columna determinada, luego realizar dos análisis de elemento finito individuales. Primero, la columna pandeada está modelada sin conexiones para determinar el momento máximo (M) creado cuando éste es pandeado dentro del contacto con la pared. Este momento es luego aplicado a la conexión en cuestión en una segunda evaluación de elemento finito. En el segundo análisis, el esfuerzo de flexión en la conexión debido al pandeo es sobreimpuesto sobre el esfuerzo desde el enroscado de la conexión. Los esfuerzos combinados son luego ingresados en el modelo de crecimiento de grieta de Forman para calcular la vida de fatiga normalizada bajo las circunstancias determinadas. La vida de fatiga es convertida a Índice de Estabilidad usando la ecuación A.17. El proceso es repetido para los varios tamaños de columna, las conexiones y los tamaños de agujero para generar curvas como la figura 18.

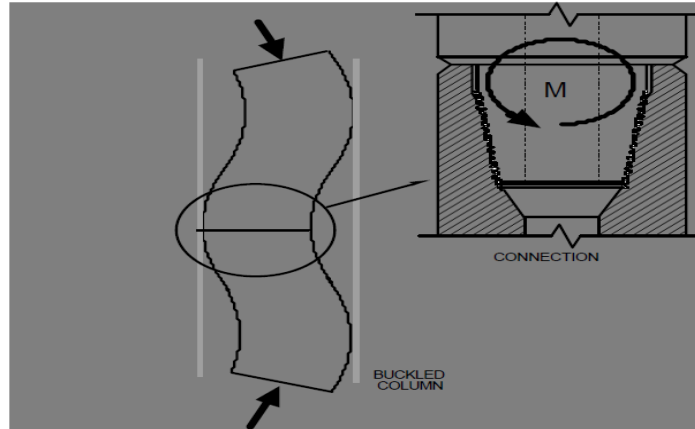


Figura 18. Donde se muestra el pandeo de la tubería causando una grieta.

$$SI = \frac{5 \times 10^8}{\text{Número de ciclos a fallar}} \quad (A 17)$$

Donde:

SI = Índice de Estabilidad.

El Índice de Estabilidad se aplica a ambos, el lastrabarrena y el HWDP. Es útil para comparar una alternativa de diseño con otra para seleccionar la alternativa más favorable desde un punto de vista de fatiga. Las suposiciones en este cálculo incluyen:

- El aparejo de fondo es liso (sin estabilizadores).
- Las conexiones involucradas no emplearon las características de alivio de esfuerzo.
- Las conexiones fueron apretadas de acuerdo al torque de enrosque de la API.
- La sección del aparejo de fondo se asume que está operando bajo justo el suficiente peso en barrena para ser pandeado y en contacto con los lados del agujero del pozo. El contacto del hoyo sobre el HWDP ocurre en la unión de la herramienta.

Apéndice B – Derivaciones de las fórmulas.

Para tubería de perforación bajo cargas axiales en un agujero de pozo curvado, el momento de flexión varía a lo largo del tubo de la tubería de perforación. El momento máximo de flexión sobre el tubo de la tubería de perforación ocurre en la unión de la herramienta cuando la tubería de perforación está en tensión. Esto es en contraste con el caso de cargas compresivas donde el momento máximo de flexión ocurre en medio del tubo de la tubería de perforación.

$$y(x) = \frac{1}{EIK^2} \left\{ (M_o - \frac{w_b \sin(\theta)}{K^2}) [\cosh(Kx) - 1] + \frac{S_o}{K} [\sinh(Kx) - Kx] + \frac{w_b \sin(\theta)}{2K^2} (Kx)^2 \right\} \dots \dots \dots (B.1)$$

Donde M_o y S_o son el momento de flexión y la fuerza de corte en la unión de la herramienta ($x = 0$) y son determinadas por las condiciones de los límites en medio del tubo de la tubería de perforación ($x = L$). K es definido por la siguiente ecuación:

$$K = \sqrt{\frac{T}{EI}}$$

Una condición de frontera resulta derivada del requerimiento de que la primera derivativa de la deflexión elástica en el punto medio del tubo es igual a la dirección tangencial de la pared del hoyo en ese punto. Esto es determinado por la ecuación B.2

$$\frac{dy(L)}{dx} = L \cdot c \dots \dots \dots (B.2)$$

Antes que la mitad del tubo de la tubería de perforación toque la pared del hoyo, la fuerza de corte en medio del tubo se asume como cero según se muestra en la ecuación B.3 debido a la simetría.

$$\frac{d^3y(L)}{dx^3} = 0 \dots \dots \dots (B.3)$$

Después de que la mitad del tubo de la tubería de perforación toca la pared del hoyo, la deflexión en medio del tubo queda restringida por la pared del hoyo. Esta condición de fronteras es determinada por la ecuación B.4. Esta ecuación implica que la tubería de perforación hace un contacto de punto individual con la pared del agujero en medio del tubo, o la curvatura de la línea de deflexión en medio del tubo es más pequeña que aquella de la pared del agujero.

$$y(L) = r_c + \frac{L^2 c}{2} \dots\dots\dots (B.4)$$

Donde:

$$r_c = \frac{D_{TV} - D}{2}$$

La curvatura crítica de la pared del hoyo (Cc), determinada por la ecuación A.9, es definida como la curvatura del agujero requerida para que la mitad del tubo bajo una carga tensil axial determinada. Sólo para esta condición, las ecuaciones B.2, B.3 y B.4 son simultáneamente llenadas. Al sustituir la ecuación B.1 en las ecuaciones B.2, B.3 y B.4 y sustituir c con Cc resulta en lo siguiente: de tubería de perforación justo entre en contacto con la pared del hoyo

$$\frac{1}{EIK} \left\{ \left(M_o - \frac{w_b \sin(\theta)}{K^2} \right) \sinh(KL) + \frac{S_o}{K} [\cosh(KL) - 1] + \frac{w_b L \sin(\theta)}{K} \right\} = L \cdot c_c \dots\dots\dots (B.5)$$

$$\frac{1}{EI} \left\{ \left(M_o - \frac{w_b \sin(\theta)}{K^2} \right) K \cdot \sinh(KL) + S_o \cosh(KL) \right\} = 0 \dots\dots\dots (B.6)$$

$$\frac{1}{EIK^2} \left\{ \left(M_o - \frac{w_b \sin(\theta)}{K^2} \right) [\cosh(KL) - 1] + \frac{S_o}{K} [\sinh(KL) - KL] + \frac{w_b \sin(\theta)}{2K^2} (KL)^2 \right\} = r_c + \frac{L^2 c_c}{2} \dots\dots\dots (B.7)$$

Al combinar las ecuaciones B.5, B.6 y B.7 y resolver Cc produce la ecuación A.9, que es repetida abajo:

$$c_c = \frac{D_{TV} - D}{L^2} \frac{(KL) \sinh(KL)}{2 - 2 \cosh(KL) + (KL) \sinh(KL)} + \frac{w_b L^2 \sin(\theta)}{EI (KL)^2}$$

Para la curvatura de hoyo (c) menor que Cc, la ecuación para Mo es derivada sustituyendo la ecuación B.1 en las ecuaciones B.2 y B.3. Esto resulta en lo siguiente:

$$\frac{1}{EIK} \left\{ \left(M_o - \frac{w_b \sin(\theta)}{K^2} \right) \sinh(KL) + \frac{S_o}{K} [\cosh(KL) - 1] + \frac{w_b L \sin(\theta)}{K} \right\} = L \cdot c \dots\dots\dots (B.8)$$

$$\frac{1}{EI} \left\{ \left(M_o - \frac{w_b \sin(\theta)}{K^2} \right) K \cdot \sinh(KL) + S_o \cosh(KL) \right\} = 0 \dots\dots (B.9)$$

Combinar ecuaciones B.8 y B.9 y resolver para Mo produce la ecuación A.10, que es repetida abajo:

$$M_o = \frac{KL}{\tanh(KL)} \left[EIk - \frac{w_b L^2 \sin(\theta)}{(KL)^2} \right] + \frac{w_b L^2 \sin(\theta)}{(KL)^2}$$

Para c mayor que o igual a Cc, la ecuación para Mo es derivada por sustitución de la ecuación B.1 en las ecuaciones B.2 y B.4. Esto resulta en lo siguiente:

$$\frac{1}{EIK} \left\{ \left(M_o - \frac{w_b \sin(\theta)}{K^2} \right) \sinh(KL) + \frac{S_o}{K} [\cosh(KL) - 1] + \frac{w_b L \sin(\theta)}{K} \right\} = L \cdot c \dots\dots\dots (B.10)$$

$$\frac{1}{EIK^2} \left\{ \left(M_o - \frac{w_b \sin(\theta)}{K^2} \right) [\cosh(KL) - 1] + \frac{S_o}{K} [\sinh(KL) - KL] + \frac{w_b \sin(\theta)}{2K^2} (KL)^2 \right\} = r_c + \frac{L^2 c}{2} \dots\dots\dots (B.11)$$

Combinar las ecuaciones B.10 y B.11 y resolver para Mo produce la Ecuación A.11, que se repite abajo:

$$M_o = \frac{w_b L^2 \sin(\theta)}{(KL)^2} + \frac{(KL/2)}{\tanh(KL/2)} \left[EIk - \frac{w_b L^2 \sin(\theta)}{(KL)^2} \right] + \frac{2 \cdot (KL/2)^2 \tanh(KL/2) EI \cdot r_c}{(KL/2) - \tanh(KL/2) L^2}$$

Nomenclatura para las derivaciones de la fórmula.

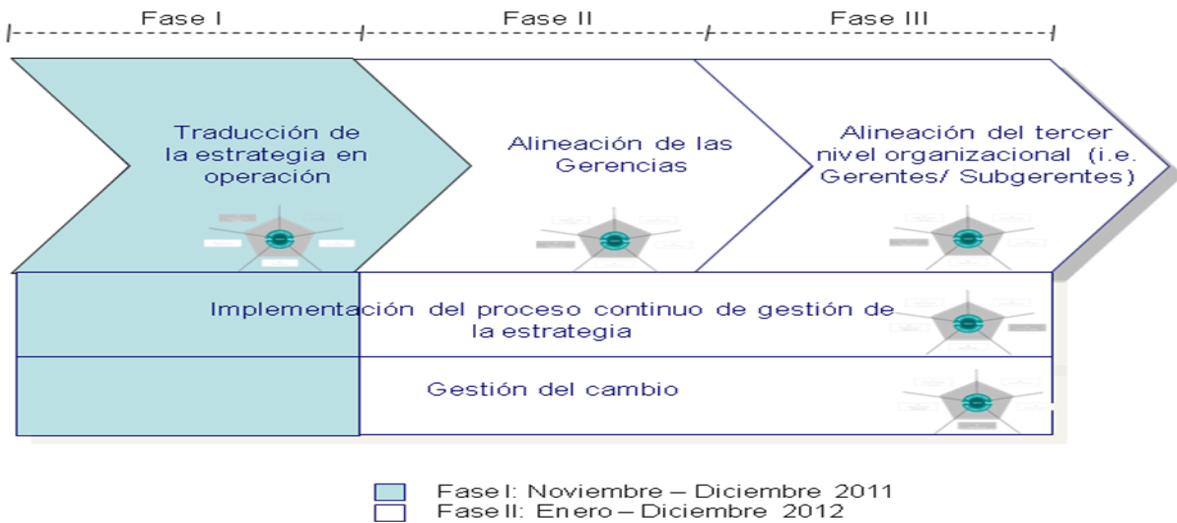
- Y = deflexión elástica para tubo de tubería de perforación, (in)
- X = longitud a lo largo del tubo de tubería de perforación desde la unión de la herramienta, (in)
- D = diámetro externo del tubo de la tubería de perforación, (in)
- DTJ = diámetro externo de la unión de herramientas de la tubería de perforación (in)
- E = módulo de Young, (psi)
- I = momento de inercia del tubo de la tubería de perforación, (in⁴)
- L = mitad de la longitud del tubo de la tubería de perforación, (in)
- T = carga axial tensil. (lbs)
- Mo = momento de flexión sobre el tubo de la tubería de perforación en la unión de herramientas, (in-lbs)
- So = fuerza de corte en el tubo de la tubería de perforación en la unión de herramientas, (lbs)
- θ = ángulo de promedio de inclinación a través del tubo de tubería de perforación, (radianes)
- c = curvatura de la pared del agujero, (in⁻¹)
- Cc = curvatura crítica de la pared del agujero, (in⁻¹) (curvatura de la pared del agujero requerida para que la mitad del tubo de tubería de perforación justo contacte la pared del agujero para una carga tensil axial determinada)
- Wb = peso flotado por longitud de unidad, (lb/in)

Tomado del artículo. IADC / SPE 87188. Un enfoque de diseño innovador para reducir la fatiga de la sarta de perforación. Tom Hill, P.E., SPE, Sean Ellis, SPE, Kang Lee, PhD, SPE, Nicholas Reynolds, SPE, Nanjiu, Zheng, PhD, T H Hill Associates, Inc.

CAPITULO 3 IMPLEMENTO DEL BALANCE SCORECARD.

3.1 Enfoque metodológico.

Se ha planteado el siguiente enfoque metodológico para el diseño e implantación del Balanced Scorecard para el uso de la aplicación de la Ingeniería de Fatiga en la Unidad Operativa Comalcalco.



3.2 Traducción de la Estrategia.

Durante la Fase I (actual) se desarrollarán el mapa estratégico, indicadores, metas e iniciativas de la Ingeniería de Fatiga. También se pondrá en marcha el proceso de Reuniones de Revisión y Actualización (RAE) de la Estrategia para el uso de la Aplicación de la Ingeniería de Fatiga (AIF).



3.3 Desafíos Estratégicos identificados.

Cientes

- Desafíos estratégicos de cara al cliente.

- ✓ Ser la mejor opción en perforación, terminación y mantenimiento de pozos, Aplicación de la Ingeniería de Fatiga.
- ✓ Trabajar con los activos y buscar sinergias operativas.
- ✓ Reducción de costos.
- ✓ Asumir responsabilidades basados en ética y profesionalismo.
- ✓ Fortalecer el cambio cultural.

- Desafíos estratégicos internos.

Procesos Internos

- ✓ Planeación y programación de corto, mediano y largo plazo.
 - ✓ Trabajo con disciplina operativa.
 - ✓ Bajar el índice de accidentabilidad.
 - ✓ Implementar el sistema SSPA.
 - ✓ Control de Procesos de perforación y mantenimiento.
 - ✓ Modelos de contratación eficientes y mejorar procesos licitatorios.
 - ✓ Controlar la calidad de los proveedores.
 - ✓ Simplificación de la normatividad interna y externa.
 - ✓ Estandarización de mejores prácticas en procesos operativos y administrativos.
- Implementación de la metodología VCDSE.

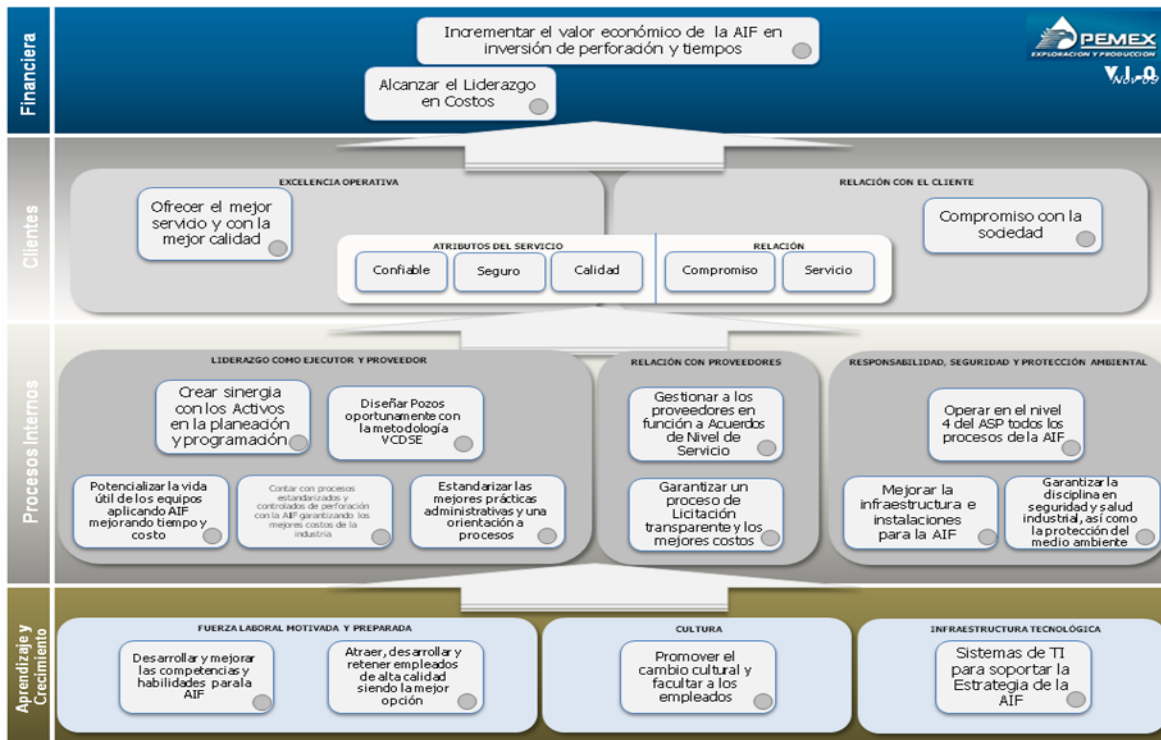
3.4 Desafíos Estratégicos identificados.

Aprendizaje y Crecimiento

- Desafíos estratégicos en capital humano, tecnológico y organizacional.
- ✓ Mejorar competencias y habilidades del personal.
- ✓ Capacitar, actualizar y certificar al personal operativo.
- ✓ Retener al capital intelectual.
- ✓ Gestionar adecuadamente la tecnología.

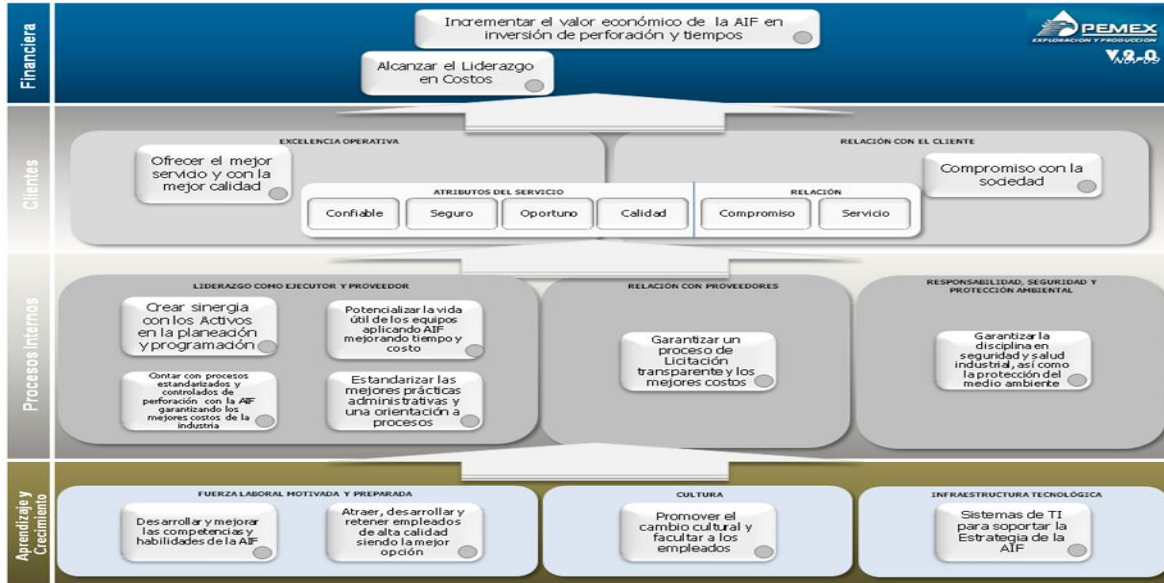
3.5 Mapa Estratégico de la Aplicación de la Ingeniería de Fatiga.

(Versión 1, Validación Entrevistas Ejecutivas).



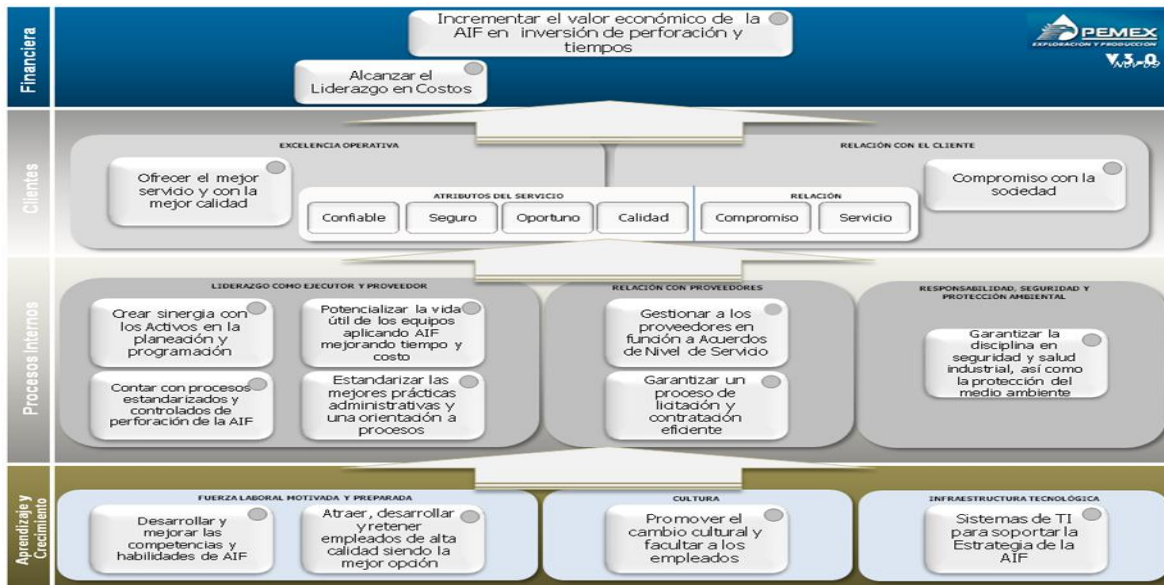
3.6 Mapa Estratégico de la Aplicación de la Ingeniería de Fatiga.

(Versión 2, Validación Entrevistas Ejecutivas).



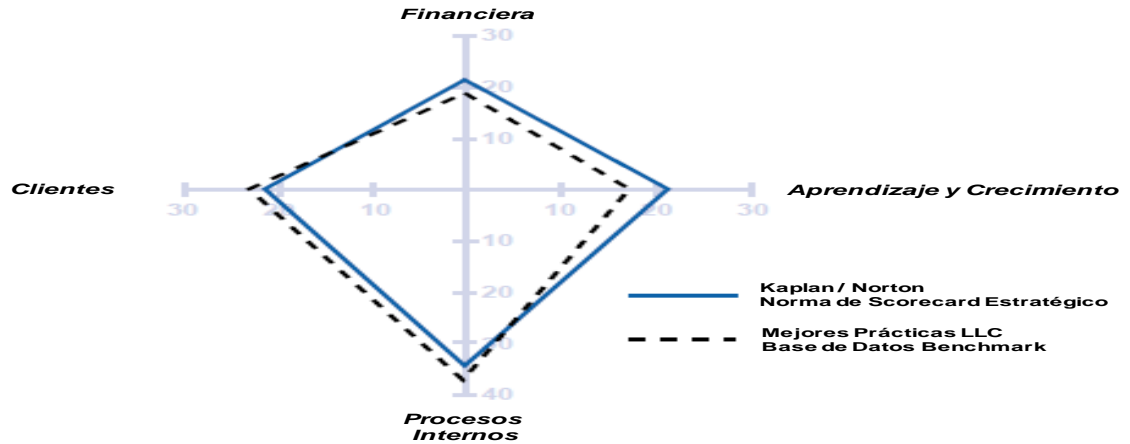
3.7 Mapa Estratégico de la Subdirección de la AIF.

(Versión 3, Validación Entrevistas Ejecutivas).



3.8 Fundamentos de Diseño – Mejores Prácticas.

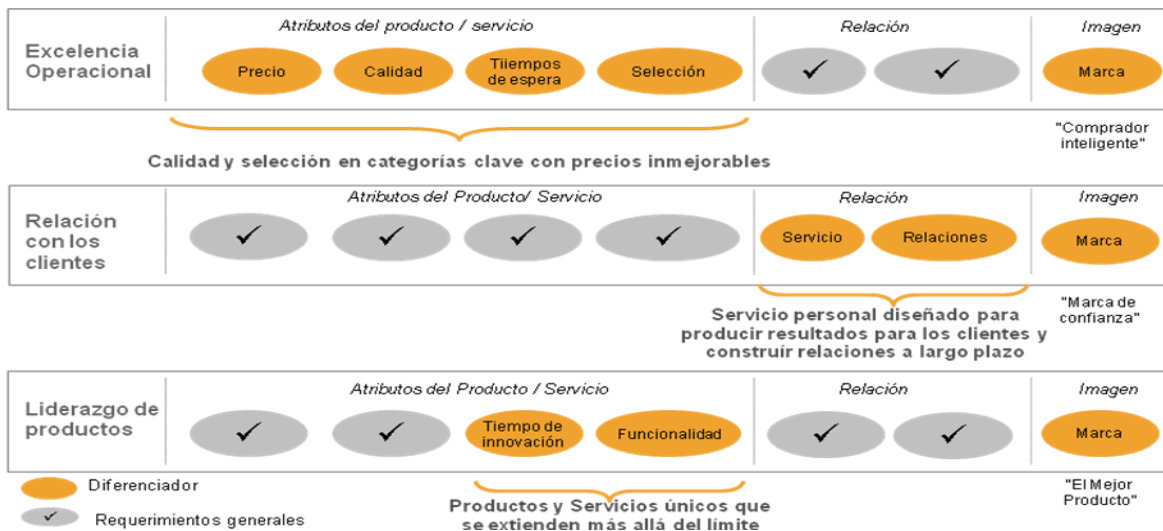
**Perfil Normativo de BSC
(porcentaje de indicadores)**



I. Financiera	5 Indicadores (22%)
II. Clientes	5 Indicadores (22%)
III. Procesos Internos	8 - 10 Indicadores (34%)
IV. Aprendizaje y Crecimiento	5 Indicadores (22%)

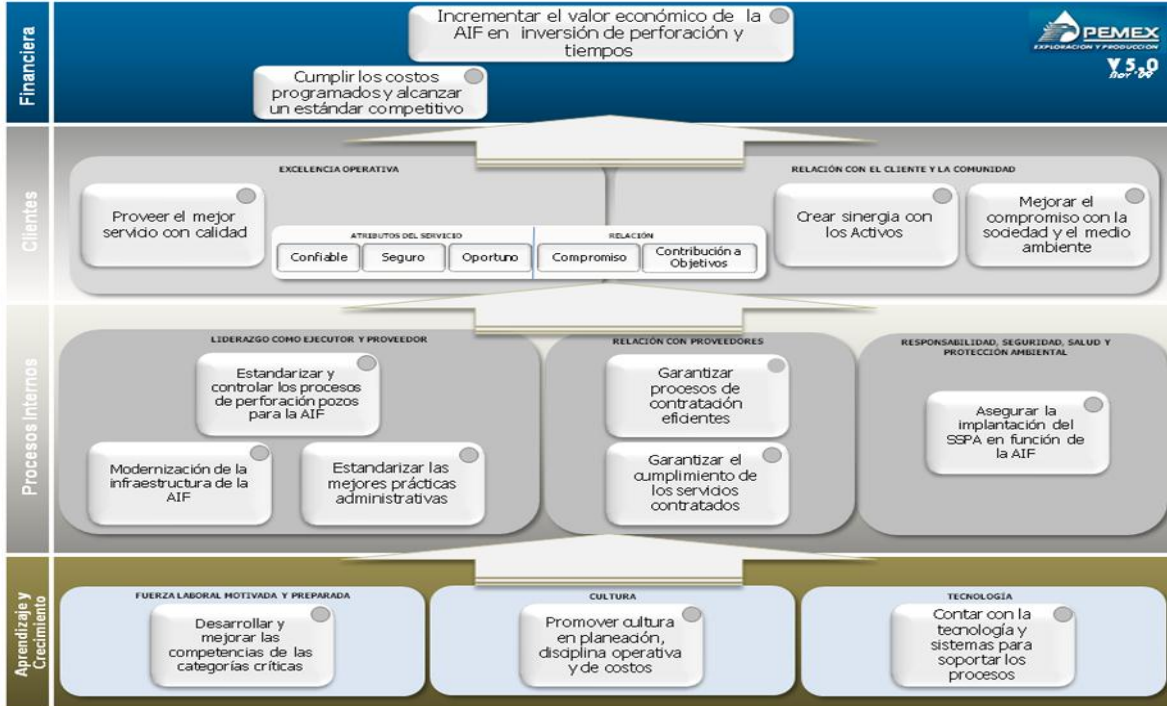
Detalle de las Propuestas de Valor

✓ Estrategias Diferenciadoras



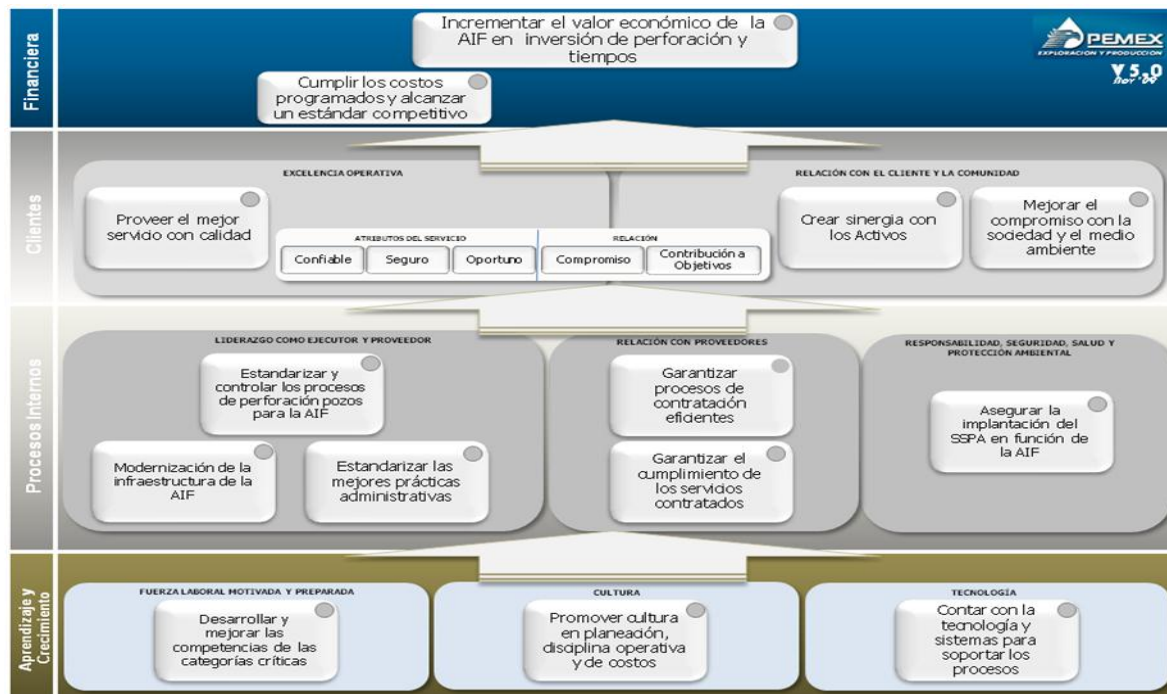
3.9 Mapa Estratégico de la AIF.

(Versión 4, Propuesta de la AIF).



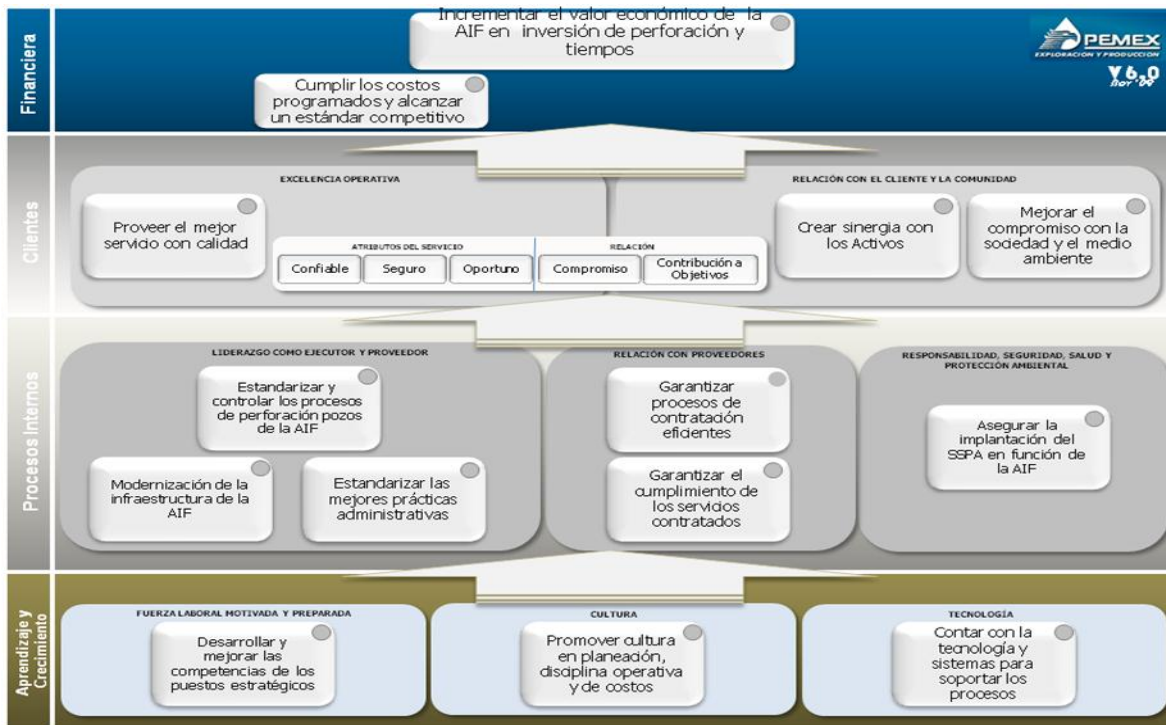
3.10 Mapa Estratégico de la AIF.

(Versión 5, Propuesta de la AIF).



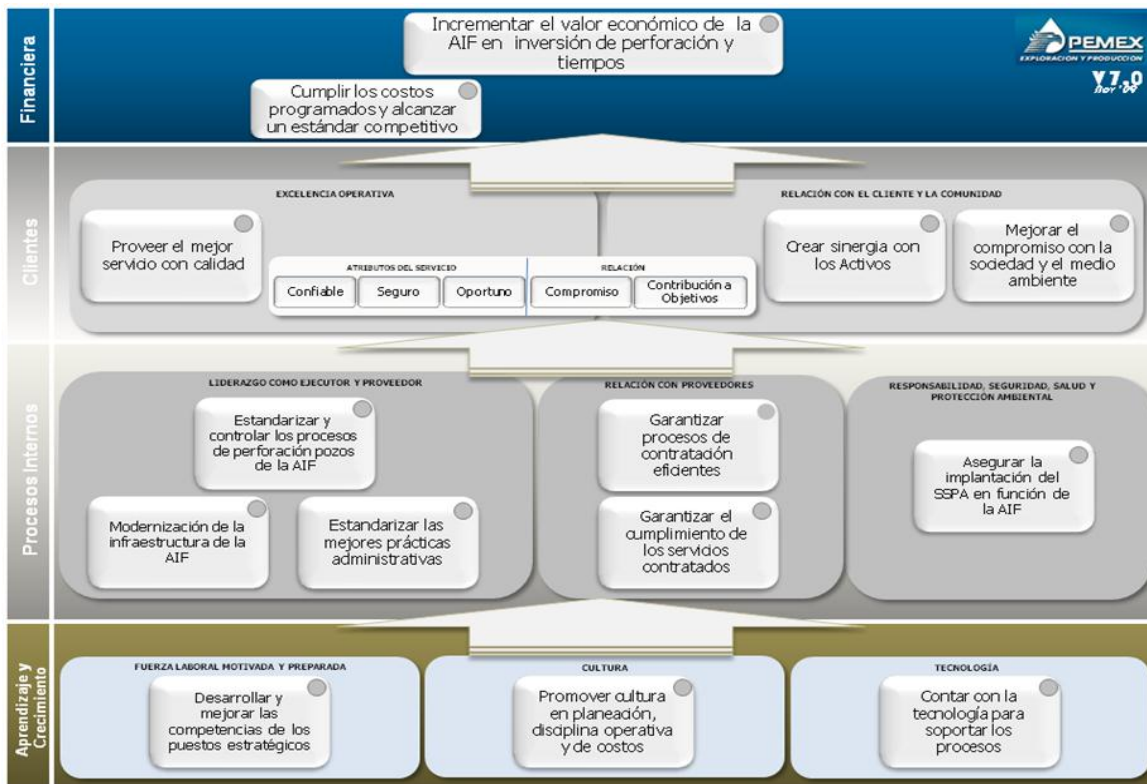
3.11 Mapa Estratégico de la AIF.

(Versión 6, Propuesta de la AIF).



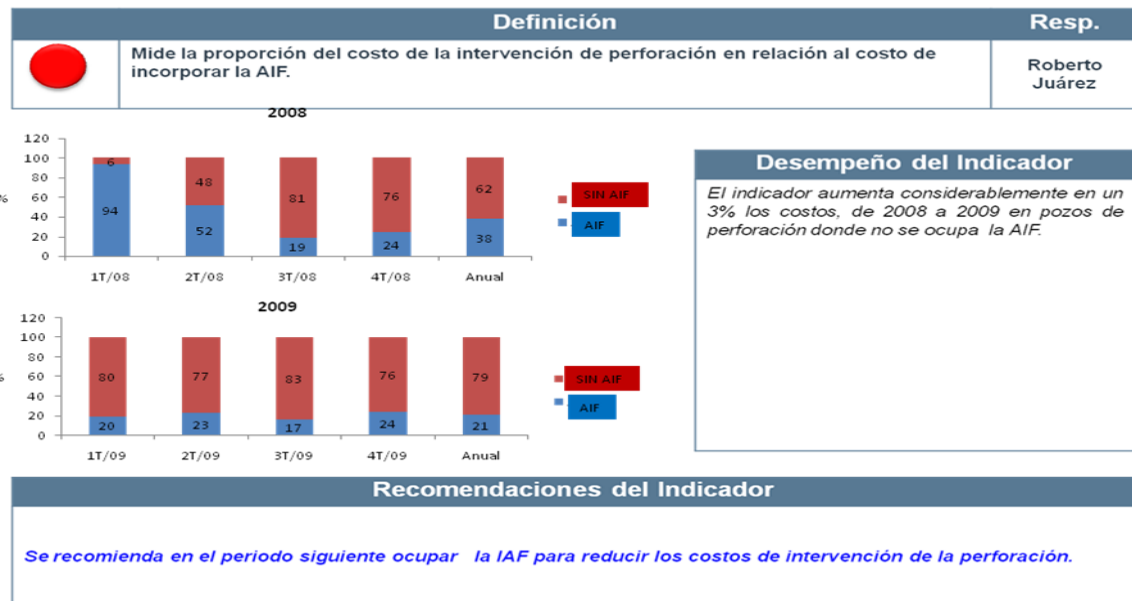
3.12 Mapa Estratégico de la AIF.

(Versión 7, Propuesta de la AIF).

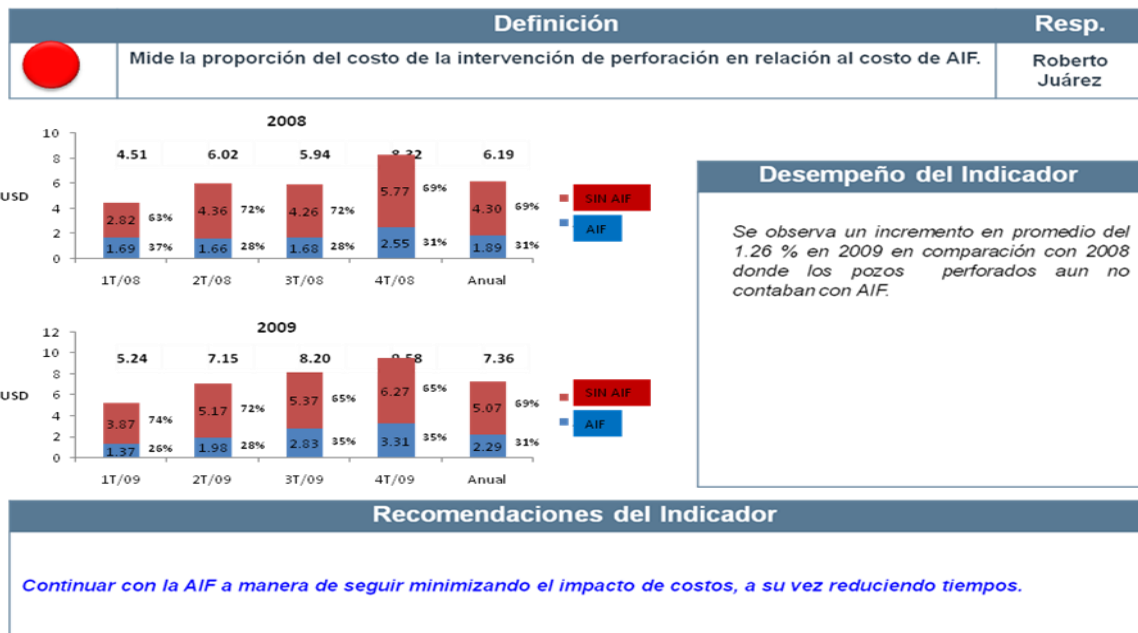


3.13 INDICADORES BSC AIF.


Impacto del costo de la intervención en el costo de la AIF Incorporado

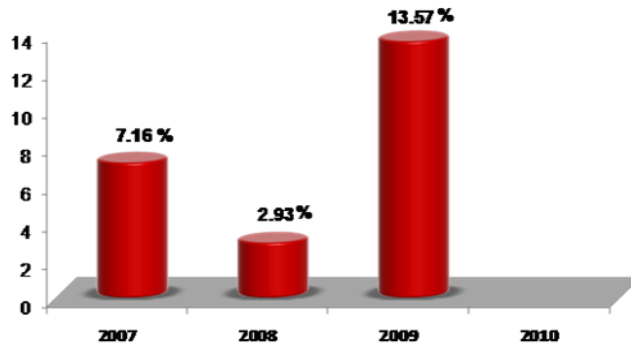


Impacto del costo de la intervención en el costo de AIF



Índice de desviación en costos programados

Definición		Resp.
	Mide la variación de los costos programados y los costos reales de las intervenciones a pozos (perforaciones).	Roberto Juárez




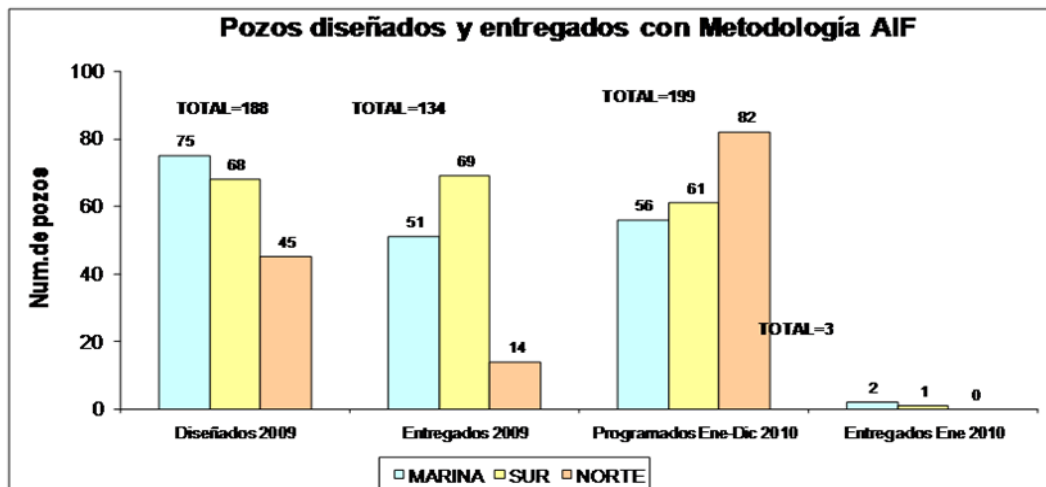
Desempeño del Indicador

El indicador se incrementó en el 2009 debido al cambio en la cultura de costos de AIF ya que anteriormente se consideraba el costo programado de SAP R/3 que incluía el incremento de los requerimientos. A partir del 2009 se considera el costo de autorización de Cédulas en las cuales no incluye los requerimientos adicionales.


Recomendaciones del Indicador	
<ul style="list-style-type: none"> • Actualizar las cédulas de autorización de costos de acuerdo a la modificación del programa. • La variación en los costos de las reparaciones mayores y menores no se pueden documentar a la fecha por no tener implementado el COSTO PROGRAMADO, de estas intervenciones. 	

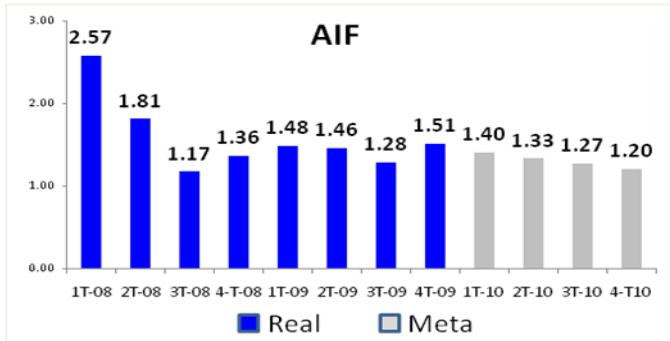
Índice de entrega de Pozos con AIF

Definición		Resp.
	Mide el porcentaje de pozos entregados al activo donde se tuvo interacción y trabajo en equipo para ejecutar la metodología AIF.	Roberto Juárez



Índice de frecuencia de problemas


Definición		Resp.
	Cantidad de problemas operativos en la etapa de perforación por cada 100 días-equipos de operación en actividades de perforación. (Donde el Día-equipos es la suma de los días que operan una cantidad de equipos en un periodo).	Roberto Juárez

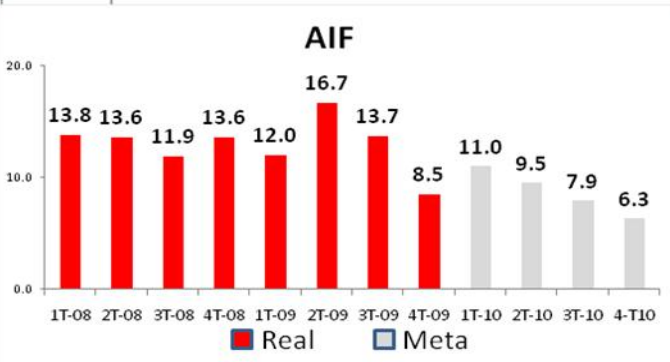


Desempeño del Indicador
Reducir la incidencia de problemas operativos mejorando el comportamiento consistentemente.
Meta 2010 reducir en un 20 %

Recomendaciones del Indicador
<i>Información de la División Sur.</i> Se deberá integrar la información de comportamiento y metas de las Divisiones Marina y Norte, actualmente en elaboración con fecha compromiso 10 de Diciembre 2010

Índice de impacto de problemas


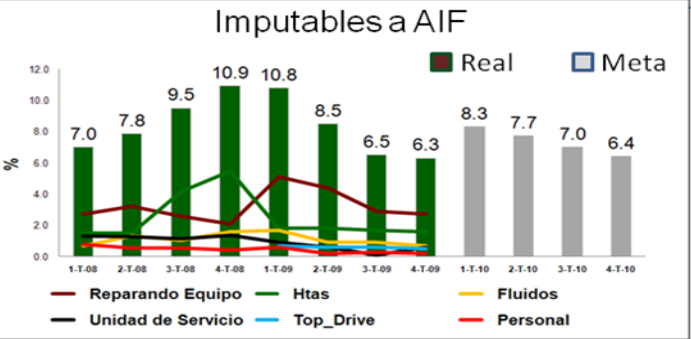
Definición		Resp.
	Tiempo promedio de solución de problemas operativos ocurridos en la etapa de perforación.	Roberto Juárez




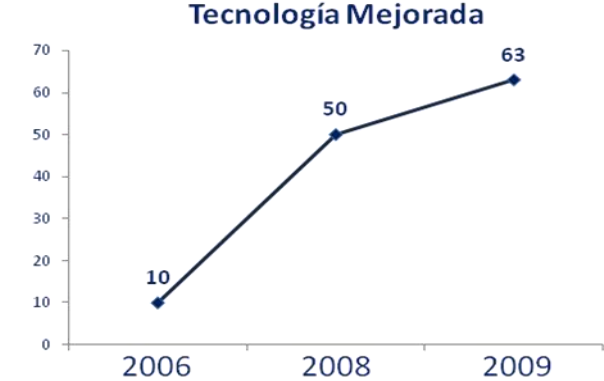
Desempeño del Indicador
Mejorar la solución de los problemas operativos disminuyendo su impacto en el desempeño.
Meta 2010 reducir en un 50 %

Recomendaciones del Indicador
<i>Información de la División Sur.</i> Se deberá integrar la información de comportamiento y metas de las Divisiones Marina y Norte, actualmente en elaboración con fecha compromiso 11 de Diciembre 2010

Índice de días de espera


Definición		Resp.
	Porcentaje de esperas operativas clasificadas por tipo, durante la actividad de perforación .	Roberto Juárez
<p style="text-align: center;">Imputables a AIF</p> 		<p style="text-align: center;">Desempeño del Indicador</p> <p>Disminuir los tiempos no productivos disminuyendo su impacto en el desempeño</p> <p>Meta 2010 reducir en un 50 %</p>
Recomendaciones del Indicador		
<p><i>Información de la División Sur.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Se deberá integrar la información de comportamiento, actualmente en elaboración con fecha compromiso 11 de Diciembre 2010 		

Tecnología mejorada en la AIF


Definición		Resp.
	Mide el nivel de implementación y madurez sobre la utilización de nuevas tecnologías en los procesos sustantivos de perforación (Perforación, terminación).	Roberto Juárez
<p style="text-align: center;">Tecnología Mejorada</p> 		<p style="text-align: center;">Desempeño del Indicador</p> <p>En el periodo 2006 – 2009 se han logrado mejorar la tecnología de la AIF.</p>
Recomendaciones del Indicador		
<ul style="list-style-type: none"> Realizar reuniones con las divisiones para definir la cartera de proyectos y el programa de aplicación de tecnología. Identificar contratos susceptibles de realizar las adendas que incluyan la tecnología por mejorar. Contar con suficiencia presupuestal abanderada, para formalizar contratos y adendas. 		

3.14 INICIATIVAS BSC AIF.


Implantación del Balanced Scorecard en la AIF

Descripción		Resp.			
	Implementar un Modelo de Gestión Administrativa, basado en indicadores, objetivos e iniciativas que permita desarrollar la estrategia para alcanzar la misión y la visión de la AIF.	Roberto Juárez			
Hitos Principales		%	Inicio	Fin	Resp.
FASE I - Diseño del BSC de la AIF					
Mapa Estratégico de la de AIF. (Objetivos y Temas Estratégicos).		100	6-Oct-10	23-Oct-10	RJ
Indicadores Estratégicos. (Medidores de Objetivos Estratégicos).		100	27-Oct-10	14-Nov-10	RJ
Establecer las Metas (Corto, Mediano y Largo Plazo).		50	3-Nov-10	2-Feb-11	RJ
Iniciativas Estratégicas (Priorización: Matriz de Impacto).		100	17-Nov-10	2-Feb-11	RJ
Reunión de Análisis Estratégico (RAE).		50	6-Oct-10	10-Feb-11	RJ
FASE II - Diseño del BSC de las áreas sustantivas y soporte de la AIF					
Cascadeo del Modelo de Gestión (Identificar áreas clave que lo requieran y mapas de contribución)		-	2-Feb-11	31-Oct-11	RJ
Implementación de la OSM (Oficina de Gestión de la Estrategia).		-	1-Mar-11	31-Jul-11	RJ
Generar un Plan de Comunicación de la Estrategia.		-	1-May-11	31-Ago-11	RJ
Implementación de PMO (Oficina de Gestión de Proyectos).		-	1-Nov-11	31-Dic-11	RJ
Estatus / Recomendaciones					
<ul style="list-style-type: none"> Concluir con las reuniones de PRE-RAES al 100%, y realizar la primera RAE (de ensayo) para iniciar con el aprovechamiento de la metodología BSC. 					

Pozos oportunamente diseñados con la Metodología AIF en la Perforación y Terminación.

Descripción		Resp.			
	Asegurar que los diseños de la perforación y terminación de pozos estratégicos se realicen oportunamente en equipos multidisciplinares empleando la metodología AIF.	Roberto Juárez			
Hitos Principales		%	Inicio	Fin	Resp.
Fase I (Todos los estratégicos - Dic '12).					
Contar con una cartera de pozos a diseñar (POA y POT).		27	15-Sep-10	31-DIC-11	RJ
Estandarización de la metodología en todos los equipos.		5	2-Ene-11	31-DIC-11	RJ
Cumplir con las 5 fases de la metodología AIF en cada pozo (Ejecutar la fase de seguimiento en tiempo real).		11	2-Ene-11	31-DIC-11	RJ
Capacitar e integrar a los Ingenieros de Diseño en el proceso de la A.IF		0	01-Mar-11	31-DIC-11	RJ
Contar con la Infraestructura adecuada para los procesos de la AIF.		0	01-Feb-11	31-DIC-11	RJ
Fase II (Todos los pozos - Dic '12).					
		-	15-Sep-11	31-Dic-12	RJ
Estatus / Recomendaciones					
<ul style="list-style-type: none"> Se trabajan con pozos estratégicos (costo >10MMDD). Se requiere realizar la adecuación del módulo de Ingenieros de Diseño, que actualmente está por "número de equipos", a "número de intervenciones a diseñar dentro de la AIF". Definir un programa de selección, reclutamiento y capacitación de ingenieros petroleros de nuevo ingreso para incorporarse a la función de diseño. Gestionar a través de la STE y/o contratación para la capacitación en la metodología AIF a los ingenieros. 					


Participación e involucramiento de AIF en la Planeación de los Proyectos de los Activos.

Descripción		Resp.
	Planear los proyectos de manera conjunta con los activos (trabajando en equipo) dando a conocer la normatividad vigente bajo la cual opera la AIF y coadyuvando al cumplimiento de las metas de exploración y producción.	Roberto Juárez

Hitos Principales	%	Inicio	Fin	Resp.
Programa de reuniones y/o talleres.	100	28-Sep-10	16-Oct-10	RJ
Definición y realización de presentación de la iniciativa	20	16-Oct-10	28-Feb-11	RJ
Definición de problemáticas de AIF (talleres y planes de acción de mejora -AIF)	10	26-Oct-10	13-Dic-11	RJ
Evaluación de resultados y programa de mejora.	-	01-Mar-11	16-Dic-11	RJ

Estatus / Recomendaciones
<ul style="list-style-type: none"> Se trabajo para establecer el objetivo de la iniciativa y el programa de trabajo. De manera interna en la AIF se trabajo para detectar las áreas de oportunidad sobre puntos a desarrollar en las reuniones de trabajo y la identificación de propuesta que se hará, concluyendo que las dos líneas de acción son: Involucramiento en la planeación de los proyectos haciendo del conocimiento los procesos para contar con sus requerimientos , Atención a sus requerimientos de intervenciones a pozos respetando las nuevas disposiciones.


Infraestructura administrativa, operativa y de mantenimiento modernizada

Descripción		Resp.
	Modernizar la infraestructura estratégica de equipos, talleres y oficinas que permita a la AIF ser eficiente y competitiva cumpliendo con los estándares de seguridad, salud y protección ambiental.	Roberto Juárez


Hitos Principales	%	Inicio	Fin	Resp.
EQUIPOS				
Selección y jerarquización de equipos.	100	31-Ago-10	6-Oct-10	RJ
Elaborar y documentar el proyecto por equipos.	100	7-Oct-10	18-Dic-10	RJ
Gestionar autorización del proyecto y suficiencia presupuestal.	30	1-Ene-11	18-Oct-11	RJ
Ejecución del proyecto.	-	19-Oct-12	30-Oct-12	RJ
TALLERES - PLANTAS				
Determinación de talleres y plantas estratégicas.	20	11-Ene-11	10-May-11	RJ
Elaborar y documentar el proyecto por cada una de las plantas o talleres estratégicos.	-	10-May-11	21-Jun-11	RJ
Gestionar autorización del proyecto y suficiencia presupuestal.	-	21-Jun-11	1-Sep-11	RJ
Ejecución del proyecto.	-	10-May-11	6-Mar-12	RJ

Estatus / Recomendaciones
<ul style="list-style-type: none"> Se ha autorizado la compra de 10 equipos de perforación . Se documentó la inversión de 12 equipos de reparación de pozos.

Procesos Controlados de Perforación, Terminación.

Descripción		Resp.			
	Cumplir los programas de trabajo en tiempo y costo en la AIF.	Roberto Juárez			
Hitos Principales		%	Inicio	Fin	Resp.
		-	22-Sep-10	31-Mar-11	RJ
	Planeación de la ejecución.	30	22-Sep-10	31-Mar-11	RJ
	Ejecución del programa.	0	1-Feb-11	31-Dic-11	RJ
	Evaluación de la ejecución por etapas.	0	1-Mar-11	31-Dic-11	RJ
	Retroalimentación a la ejecución.	0	1-Mar-11	31-Dic-11	RJ
Estatus / Recomendaciones					
<ul style="list-style-type: none"> •Inicio desarticulado del programa de la iniciativa. •Falta de difusión y de responsabilidades asociadas. •Se programa reuniones de difusión con las áreas involucradas. 					

Personal Competente de Alto Desempeño.

Descripción		Resp.			
	Asegurar que el personal de la AIF cuente con las competencias certificadas requeridas para un alto desempeño.	Roberto Juárez			
Hitos Principales		%	Inicio	Fin	Resp.
	Contar con la Base de Datos Dinámica del personal de la AIF.	15	15 Ene 11	30 Jun 11	RJ
	Adecuar la infraestructura.	10	1 Ene 11	31 Dic 11	RJ
	Revisar y actualizar los perfiles de los puestos estratégicos. Fase I: Superintendente Plataforma, Coordinadores de Pozo, ITP, ITR, Perforador, Enc. Op. Equipo)	-	8 Feb 11	15 Abr 11	RJ
	Evaluar las competencias del personal estratégico Fase I.	-	1 Mar 11	31 Jun 11	RJ
	Actualizar los programas de capacitación y entrenamiento para las categorías de puestos estratégicos Fase I.	-	15 Mar 11	30 Jul 11	RJ
	Gestionar ante RH las tripulaciones de relevo.	-	1 May 11	31 Dic 11	RJ
	Ejecutar el programa de capacitación y entrenamiento del personal Fase I.	-	1 Ene 11	31 Dic 12	RJ
Estatus / Recomendaciones					
<p>Se recomienda contar con los tetranomios presupuestales en tiempo y forma debidamente abanderados, así como contar con la disponibilidad del personal estratégico para llevar a cabo el programa de cierre de brechas. Así mismo se solicita modificar el alcance de la descripción de la iniciativa eliminando la palabra "Certificada".</p>					

CAPÍTULO 4.- ANÁLISIS DE RESULTADOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA INGENIERÍA DE FATIGA.

El Análisis Causa Raíz es una metodología utilizada para identificar las causas raíces (físicas, humanas y de sistema) de cualquier tipo de falla o problema, con el objeto de determinar el plan para resolver o erradicar su recurrencia. En este caso ha sido utilizada para analizar el problema relacionado con las “Operaciones de pesca recurrentes en pozo Chaya 1a de la UO Comalcalco”.

La aplicación de esta metodología esta basada en la “Guía para la Solución de Problemas mediante la Metodología de Análisis Causa Raíz (ACR) en PEMEX Exploración y Producción”, Clave: 202-64000-GMA-211-0002, año 2007, del Sistema de Confiabilidad Operacional; el “Procedimiento para el Análisis e Investigación de Incidentes / Accidentes o Fallas Crónicas con la Metodología Análisis Causa Raíz (ACR)”, de la Subdirección de Seguridad Industrial, Protección Ambiental y Calidad, Clave: PG-SS-TG-001-2007, año 2007; y la “Guía Técnica para la Investigación y Análisis Causa Raíz de los incidentes y/o accidentes SSPA”, Clave: 800/16000/DCO/GT/043/10, año 2010.

4.1 Análisis causa raíz primer pez a 1234 m, Pozo Exploratorio Chaya 1 A.

PEMEX EXPLORACION PRODUCCION DIVISION SUR U. O. COMALCALCO

REPORTE DIARIO DE OPERACIONES 30/03/2011 Proyecto PIN-PTE ACTIVO REGIONAL EXPLORACION SUR

30/03/2011 Proyecto PIN-PTE ACTIVO REGIONAL EXPLORACION SUR

Operación	Pozo: CHAYA 1 A (EXP)
0:00-1:00	(N) CON BNA. PDC 17 1/2" Y SARTA ORIENTADA CON AMPLIADOR CONCENTRICO 17 1/2" X 19 1/2" PERFORO A 1233 M. DONDE SUSPENDIO POR FALTA DE DIESEL PARA MAQUINAS.
1:00-2:00	(S) OPERACION CON CARGO A MANTTO. POR FALTA DE COMBUSTIBLE. CIRCULO T.A. Y RECUPERO MUESTRA DE FONDO.
2:00-4:00	(S) OPERACION CON CARGO A MANTTO. POR FALTA DE COMBUSTIBLE. SACO BNA A 725 M (ZAPAT A 20"), LIBRE. LLENANDO CADA 5 LINGADAS POR E.A.
4:00-8:00	(S) OPERACION CON CARGO A MANTTO: ESPERO DIESEL PAR MAQUINAS.
8:00-10:00	(S) METIO BNA. 17 1/2" PDC A 1233 M. FONDO PERFORADO. LIBRE. CIRCULO LIMPIANDO FONDO.
10:00-12:00	(N) CON BNA. 17 1/2" PDC Y SARTA ORIENTADA CON AMPLIADOR 17 1/2" X 19 1/2" PERFORO A 1234 M. DONDE SUSPENDIO POR FALTA DE AVANCE; RECORD: 509 M/36.58 HRS/P 4/U 3M 1 7-50-83. AMPLIADOR A 1216 M (491 M/35.50 HRS).
12:00-16:00	(N) CIRCULO T.A. PREPARO 11 M ³ DE BACHE CO OBTURANTE CONCENTRACION DE 60 KG/M ³ (20 KG DE FINO, 20 KG DE MEDIO Y 20 KG. DE COQUE). BBEFO. Y DESPELLO MISMO.
16:00-24:00	(N) SACO AMPLIADOR A SUPERFICIE; OBSERVO PINON DEL ESTABILIZADOR 9 1/2" X 19 1/2" S OBRRE DRILL COLLAR MONELL DEGOLLADO, QUEDANDO COMO PEZ. BNA. 17 1/2" PDC (0.39 M) + DOBLE CAJALISO 9 1/2" (1.59 M) + UBHO (0.88 M) + DCMONEL CON MW0 9 1/2" (9.44 M), LONG. PEZ= 12.30 M, B.P. TEORICA=1221.70 M. DESGASTE DE AMPLIADOR: 177 Y 178. PACTOR: 19866 LTS. DIESEL. FACT-685-RP-276356, SELLOS 1011047-048, FZS034 9, OPRIO. F-399380 CRISTOBAL VALDEZ REYES. LABORO GRUA #80651 DE CIA. MENDOZA DE 22-24 HRS.

Figura 1. Reporte oficial de PEMEX (pimer pez).

4.1.1 Fractura de piñón del estabilizador sobre el Drill Collar Monel.

4.1.1.1 Falla en el material del estabilizador.

4.1.1.1.1 Evidencias



SARTA CON AMPLIADOR 17 1/2" X 19 1/2"

Cant.	Herramienta	Long.	Long. Acum
105	TP 5"	1014.5	1311
18	TP PESADA 5" S-135 50 L/P	166.42	296.5
1	COMBINACION (R.DIF) (CP) 5" HD-533	1.57	130.08
1	MARTILLO HIDRÁULICO 8" R	9.48	128.51
9	LASTRABARRENA LISO 8" REG 147LB	82.41	119.03
1	COMBINACION (R.DIF) (CP) 9 1/2" REG	1.13	36.62
1	ESTABILIZADOR C.R. 9 1/2"	2.62	35.49
1	LASTRABARRENA LISO 9 1/2" REG	9.2	32.87
1	VALVULA DE CONTRAPRESIÓN 9 1/2" R	0.86	23.67
1	BARRENA CORTADOR FJO AMPL. BIC. 16 3/8"	7.9	22.81
1	ESTABILIZADOR C.R. 9 1/2"	2.61	14.91
1	LASTRABARRENA ANTIMAGNETICO 9 1/2" R	9.44	12.3
1	UBHO 9 1/2" R	0.88	2.86
1	DOBLE CAJA LISO 9 1/2" REG	1.59	1.98
1	BNA 17 1/2" PDC	0.39	0.39

Figura 2. Se describe los componentes de la sarta de perforación para efectuar la perforación con agujero de 17 1/2" y la ampliación a 14 1/2" x 17 1/2", así como la litología a perforada. (pimer pez).

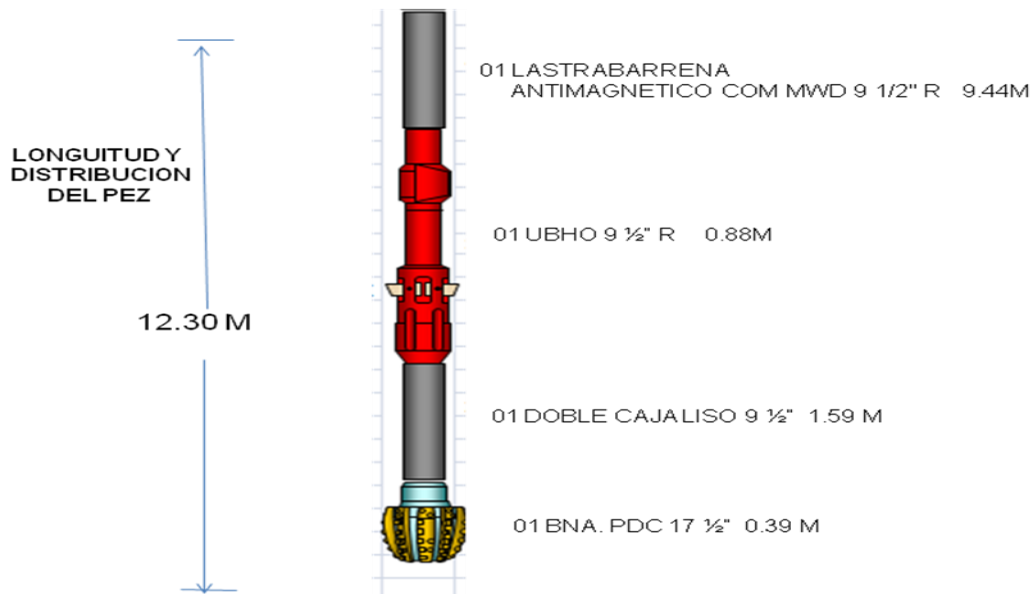


Figura 3. Se describe los componentes del pescado en la sarta de perforación físicamente salió a superficie sarta hasta estabilizador observándose degollamiento de dicha caja, quedando como longitud de pez **12.30 m**. Comprendidos desde la barrena 17 1/2" hasta el drill collar monel con mwd 9 1/2" .



Figura 4. Piñón fracturado del estabilizador de 9 ½" x 17 ½" x 3" (primer pez).

4.1.1.2 Desbalance en conexión Drill Collar Estabilizador (BSR).

4.1.1.2.1 Evidencias.

- La razón de resistencia a la flexión es la rigidez relativa de la caja con respecto al perno de una conexión dada.
- Describe el balance entre dos miembros de una conexión y cómo es probable que se comporten en ambiente cíclico de rotación.

(Artículo tomado del programa de entrenamiento acelerado para supervisores "Diseño de Sartas de Perforación y de Herramientas de Fondo" Cia Schulumberger).

Muchas conexiones de Drill Collar que fallan son el resultado de esfuerzos laterales como de esfuerzos torsionales. El Instituto Americano del Petróleo define BSR como lo siguiente:

$$BSR = \frac{\frac{D^4 - b^4}{D}}{\frac{R^4 - d^4}{R}}$$

Donde:

BSR= Fuerza de radio lateral.

D= Diámetro fuera de piñón y caja.

d= Diámetro interior del agujero.

b= Diámetro de caja y piñón.

R= Diámetro de piñón en pulgadas del exterior.

4.1.1.4 Torque inadecuado en junta del estabilizador.

4.1.1.4.1 Evidencias.

TABLA DE APRIETES UBICADA EN LA CASETA DEL PERFORADOR DEL EQUIPO PM-305

HTA.	D.I. (pulg.)	Peso (lbs/pie)	Peso (kgs/m)	Apriete (lbs/pie)
9 1/2	3	217	323.33	88,000
8	2 13/16	150	223.5	53,000
7 1/4	2 13/16	119	177.31	36,000
6 1/2	2 13/16	92	137.08	22,900
6 1/4	2 13/16	83	123.67	22,200
5	2 1/4	53	78.97	12,800
5	2	56	83.44	13,800
4 3/4	2 1/4	47	70.03	9,200
4 3/4	2	50	74.5	10,800
3 1/8	1	23	34.27	3,000

HW	D.I. (pulg.)	Peso (lbs/pie)	Peso (kgs/m)	Apriete (lbs/pie)
5	3	49.30	73.45	29,400
3 1/2	2 1/16	25.30	37.69	9,900

Tabla 2. Muestra el torque adecuado para cada junta de Drill Collar.

DRILL COLLARS – RECOMMENDED MAKE-UP TORQUE AND BENDING STRENGTH RATIOS

Size and Type of Connection	Drill Collar Bore (in.)												
	OD in.	2 1/2		2 13/16		3		3 1/4		3 1/2		3 3/4	
		ft-lb	BSR	ft-lb	BSR	ft-lb	BSR	ft-lb	BSR	ft-lb	BSR	ft-lb	BSR
NC 70	9	75,800	1.87	75,800	1.89	75,800	1.91	75,800	1.93	75,800	1.97	75,800	2.02
	9 1/4	88,800	2.08	88,800	2.10	88,800	2.12	88,800	2.15	88,800	2.19	88,800	2.24
	9 1/2	102,400	2.29	102,400	2.32	102,400	2.34	101,100	2.37	96,200	2.41	91,000	2.47
	9 3/4	113,700	2.52	108,800	2.55	105,700	2.57	101,100	2.60	96,200	2.65	91,000	2.71
	10	113,700	2.76	108,800	2.79	105,700	2.81	101,100	2.85	96,200	2.90	91,000	2.97
	10 1/4	113,700	3.01	108,800	3.04	105,700	3.06	101,100	3.11	96,200	3.17	91,000	3.24
NC 77	10	108,200	1.94	108,200	1.95	108,200	1.96	108,200	1.98	108,200	2.01	108,200	2.04
	10 1/4	124,100	2.13	124,100	2.14	124,100	2.16	124,100	2.10	124,100	2.20	124,100	2.24
	10 1/2	140,500	2.33	140,500	2.34	140,500	2.36	140,500	2.38	135,100	2.41	129,400	2.44
	10 3/4	154,300	2.53	149,000	2.55	145,500	2.56	140,500	2.59	135,100	2.62	129,400	2.66
	11	154,300	2.75	149,000	2.77	145,500	2.78	140,500	2.81	135,100	2.84	129,400	2.89
CONNECTIONS WITH FULL FACES													
7 H-90 (See Note 5)	8	53,500	1.90	53,500	1.94	53,500	1.96	53,500	2.01	53,500	2.07	53,500	2.16
	8 1/4	63,700	2.14	63,700	2.18	63,700	2.21	63,700	2.26	61,000	2.33	56,400	2.42
	8 1/2	74,500	2.39	72,100	2.43	69,300	2.46	65,300	2.52	61,000	2.60	56,400	2.70
7 5/8 API Regular	8 1/2	60,400	1.80	60,400	1.83	60,400	1.84	60,400	1.88	60,400	1.92	60,400	1.98
	8 3/4	72,200	2.02	72,200	2.05	72,200	2.07	72,200	2.11	72,200	2.16	72,200	2.22
	9	84,400	2.25	84,400	2.28	84,400	2.31	84,200	2.35	79,500	2.40	74,500	2.47
	9 1/4	96,300	2.49	91,600	2.53	88,600	2.55	84,200	2.60	79,500	2.66	74,500	2.74
	9 1/2	96,300	2.75	91,600	2.78	88,600	2.81	84,200	2.87	79,500	2.93	74,500	3.02
7 5/8 H-90 (See Note 5)	9	73,000	1.76	73,000	1.78	73,000	1.79	73,000	1.81	73,000	1.84	73,000	1.88
	9 1/4	86,000	1.95	86,000	1.97	86,000	1.99	86,000	2.02	86,000	2.05	86,000	2.09
	9 1/2	99,500	2.16	99,500	2.18	99,500	2.20	99,500	2.23	99,500	2.27	96,300	2.31

Tabla 3. Muestra el torque adecuado para cada junta de Drill Collar.



Figura 6. Pruebas realizadas al equipo ezy torque corroborando apriete adecuado considerando dos equipo de medición.

Resumen Día Anterior	CON BNA. PILOTO PDC 10 5/8", AMPLIADOR EXCENTRICO 14 1/2 X 17 1/2 Y SARTA ESTABILIZA PERFORA A 3033 M Y AMPLIA A 3000 M;	
Operación	Pozo: CHAYA-1-A (EXP)	
		MOVIMIENTO 84.15
00:00-05:00	(N) CON BNA. PILOTO PDC 10 5/8", AMPLIADOR EXCENTRICO 14 1/2 X 17 1/2 Y SARTA ESTABILIZA	PERFORACION 73.17
	0 DA PERFORO A 3057 M. Y AMPLIO A 3024 M. SUSPENDIO POR PROGRAMA PARA NIVELACION D	0 0.00
	0 E EQUIPO; RECORD: 912 M/103.33 HRS/P' 6.8/U-3M. 9-6-6 (902 M. AMPLIADOS); COND.	0 0.00
	0 5-7 TONS, 125-130 RPM, 450-550 AMPS, 148 EPM, 426 GPM, 3600 PSI, WS= 117 TONS.,	0 0.00
	0 PROCEDIMIENTO 223-21100-OP-411-0110 Y AST.	0 0.00
05:00-07:00	(S) CON BNA. PILOTO PDC 10 5/8", AMPLIADOR EXCENTRICO 14 1/2 X 17 1/2 Y SARTA ESTABILIZA	0 0.00
	0 DA A 3050 M. CIRCULO RECUPERANDO MUESTRA DE FONDO CON 148 EPM, 726 GPM, 3600 PSI	
	0 .	Total Días: 157.32
		CIAS. DE SERVICIO 2.41
07:00-10:00	(S) LEVANTO BNA. PILOTO PDC 10 5/8", AMPLIADOR EXCENTRICO 14 1/2 X 17 1/2 Y SARTA ESTABI	U.O. 6.37
	0 LIZADA A 2108 M. (ZAPATA A 2110 M). LLENANDO POR E.A. CADA 5 LINGADAS VOL. ACERO	0 0.00
	0 EXTRAIDO; PROCEDIMIENTO PE-PP-OP-002-2007 Y AST.	0 0.00
10:00-13:00	(S) CON BNA. PILOTO PDC 10 5/8", AMPLIADOR EXCENTRICO 14 1/2 X 17 1/2 Y SARTA ESTABILIZA	0 0.00
	0 DA A 2108 M. CON PNAL VOLANTA PEMEX AUXILIADO CON GRUA 60 TONS. DE CIA. MENDOZ	0 0.00
	0 A #80931, NIVELO EQUIPO. **EN INTER PNAL DE CIA. VARCO REVISO LLAVES TW60 Y	0 0.00
	0 SSW30; PNAL DE OPERACION LIMPIO FILTROS A BBA #1 Y #2; PNAL DE CIA. BRAULIO	0 0.00
	0 ZAVAAL CAMBIO ASIENTO Y VALVULAS AL MODULO #2 DE BBA#1; PNAL MANTTO. MECANICO	
	0 LIMPIO FILTROS DE AIRE A MAQUINAS #1, #2 Y #3 (NO HAY REAFACCIONAMIENTO)	Total Esperas: 8.78
13:00-14:00	(S) CON BNA. PILOTO PDC 10 5/8", AMPLIADOR EXCENTRICO 14 1/2 X 17 1/2 Y SARTA ESTABILIZA	Comptes. y Eq. Aux. F/S
	0 DA A 2110 M, CON PNAL DE OP2N. DE INSTTOS. PEMEX Y CIAS. VARCO, GSETA, PROBO A	0 00/01/1900
	0 PRIETE CON EASY TORQ, LLAVE TW-60 OBSERVANDO MISMO APRIETE LO CUAL INDICA QUE E	0 00/01/1900
	0 STAN AL MISMO CALORE.	0 0
14:00-16:00	(S) PROBO BBAS. #1 Y #2 CON 146 EPM, 717 GPM, 2850 PSI, BIEN. LUBRICO UNIFLEX Y PNAL	0 0
	0 . DE MANTTO. REVISO SISTEMA DE ACELERADOR DE PIE.	0 0

Tabla 4. Reporte siop del día 19/05/2011 del equipo pm-305.

4.1.1.5 Mala calidad del acero del estabilizador.

4.1.1.5.1 Evidencias.

Certificate No: 001
Page: 1/1
Customer S/N: 17-1/2" 7-5/8REG 4145HMOD CABOX 1



MILL CERTIFICATE

Size: O.D.: 9 1/2", Blade O.D.: 17 1/2", I.D.: 5", Length: 2.70 m
Hardfacing: HF4000
Condition: Quenched at 850°C; Tempered at 600°C

Element	C%	Mn%	S%	Cr%	Mo%	P%	S%	Ni%
Standard	0.42-0.49	1.00-1.25	0.15-0.35	1.20-1.35	0.25-0.35	<0.025	<0.025	<0.25
Actual	0.46	1.10	0.27	1.20	0.27	0.016	0.009	0.17

Mechanical Properties

Property	Required	Test Result
Tensile (Strength σ_t) (N/mm ²)	≥ 965	1120
Yield Strength $\sigma_{0.2}$ (N/mm ²)	≥ 758	1000
Impact strength-Akv (J) @ +20°C	≥ 54	56
Elongation δ_5 (%)	≥ 13	14
Hardness HRB	285-341	324
Ultrasonic Inspection (ASTM A308 & ASTM E587)	Flaw \leq ϕ 2	Accepted
Microstructure to ASTM A 275	Grain Size: \geq 7	7.5-7

Heat No: 0904-10-1

Motor Stabilizer

Purchase Order No.: OS-LDT-002-280910

Manufacturer Stamp

We herewith certify that the products are according to API Spec. 7 latest edition. **YI'AN LANDRILL OIL TOOLS CO., LTD**

Inspected by: [Signature] Date: 2010.12.4

Verified by: [Signature] Date: 2010.12.4

Figura 7. Se muestra que la calidad del acero concuerda con el certificado.

Tuboscope FECHA: 17/04/2011

SUMARIO DIARIO DE RESULTADOS

Cliente: Refinería de Huelva D.T. Cliente: _____
 del Expediente: 1 Localización: Torre del Acero D.T. PD: _____
 Tipo de Inspección: Tubo de Acero

Descripción: 5 unidades Tubo de Acero a Caliente # 80T X 4R La Huelva Refinería

REPORTE DE PRUEBA DE DUREZA

ESCALA: HRC

ANGULO	PRIMERA PRUEBA				SEGUNDA PRUEBA			
	LECT.	LECT.	LECT.	PROM.	LECT.	LECT.	LECT.	PROM.
0°	35.5	37	36	36.1	36	36	35	35.6
180°	/	/	/	/	/	/	/	/

CENTRO

ANGULO	LECT.	LECT.	LECT.	PROM.
0°	/	/	/	/
180°	/	/	/	/

EQUIPO UTILIZADO

EQUIPO / INSTRUMENTO	No. I.D.	VENC. CALIBRACION
DUROMETRO	<u>TTN-01</u>	<u>4-Julio-2011</u>

VPN	ROCKWELL SCALES											BRINELL		SCLERO-SCOPE	U.T.S.						
DPH HV/10	A	B	C	D	E	F	G	H	K	15N	30N	45N	15T	30T	45T	BHN 500kg	BHN 3000kg		Kpsi	Mpa	
363	69	11	37	53						79	57	40					344		50	169	1165
354	69	10	36	52						78	56	38					336		49	165	1138
345	68	10	35	52						78	55	37					327		48	160	1103

Figura 8. Reporte de dureza donde se comprueba que no existe mala calidad en el acero.

4.1.1.6 Alta vibración lateral en Sarta de Perforación. (Ingeniería de Fatiga).

4.1.1.6.1 Evidencias.

Sacudir, Golpear y Doblar.

La vibración en la sarta de perforación puede ser dividido dentro de tres tipos o modos: axial, torsional y transversal. La vibración axial causa que la barrena salte periódicamente y que la perforación no sea eficiente, lo cual conduce a que la barrena sea dañada de igual manera que la sarta de perforación, esto incrementa el tiempo durante la perforación y puede ser detectado en superficie.

Las vibraciones torsionales causan agujeros inestables además de que fatigan las conexiones de los Drill Collar, daña la barrena haciendo que la perforación sea lenta.

La más reconocible manifestación de vibración torsional es el stick-slip (deslizamiento). Las altas velocidades durante la fase de deslizar también es uno de los tres tipos: vibración transversal. Sin embargo los análisis de vibración transversal no pueden tener modelos armónicos. Esto es importante porque en el pasado se creía que los cambios finos en la sarta de perforación variaban el radio de rotación (revoluciones por minuto) y que el peso sobre barrena ocasionaba vibraciones transversales que han estado iniciadas en el agujero. Estudios hechos por la empresa Anadrill revela que una de las muchas vibraciones comienza con el cambio fino de los parámetros de perforación.

Tomado del artículo: Putting a Damper on Drilling's Bad Vibrations.

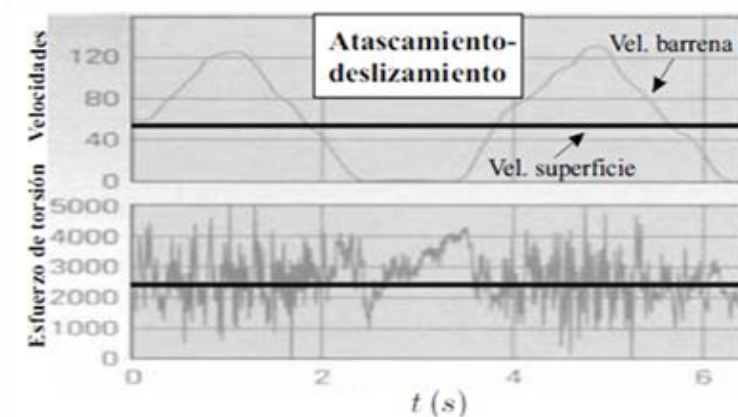


Figura 9. Fenómenos asociados al movimiento de atascamiento-deslizamiento de la barrena: velocidades en la parte superior de la sarta y en la barrena, junto con el esfuerzo de torsión.

Tomado del artículo: vibraciones mecánicas en una sarta de perforación: problemas de control.

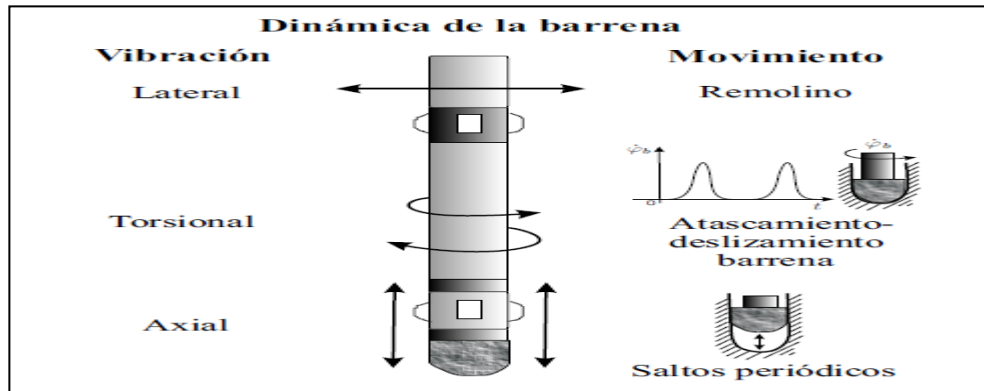


Figura 10. Vibraciones mecánicas en una sarta de perforación. Consecuencias de las mismas.

Conexiones de los Drill Collars.

Las conexiones de la tubería de perforación no tienen características de liberación de esfuerzo puesto que el cuerpo flexible se dobla fácilmente y absorbe la mayor parte del esfuerzo de doblamiento que se aplica.

Por lo tanto las conexiones de la tubería de perforación están sujetas a menos doblamiento que el cuerpo de la misma.

En cambio los Drill Collar y otros componentes de la herramienta de fondo son mucho más rígidos que la tubería de perforación y en ellos gran parte de los esfuerzos por doblamiento se transfieren a las conexiones. Estos esfuerzos por doblamiento pueden causar falla por fatiga en las conexiones.

4.1.1.6.2 Uso de parámetros inadecuado durante la perforación.

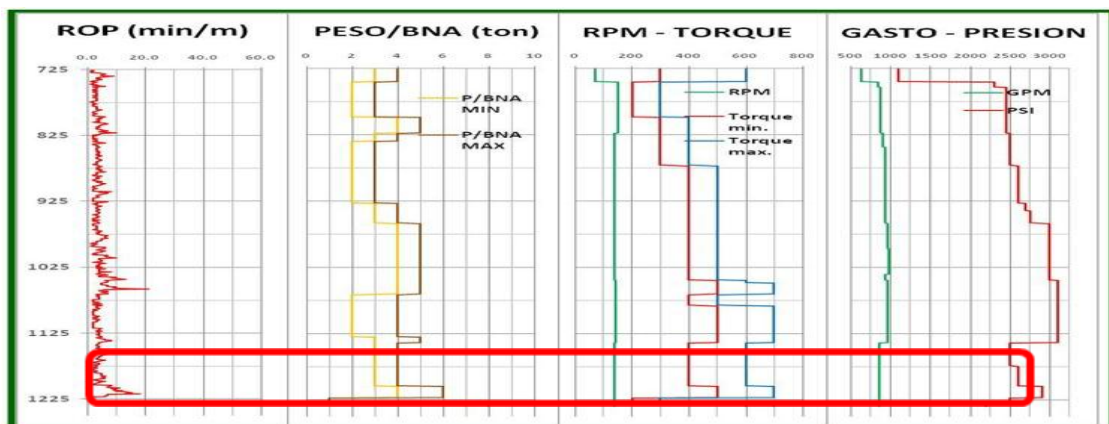


Figura 11. Parámetros de Perforación. La profundidad de 1225 m se observa vibración.

Las vibraciones son inevitables en una perforación. Sin embargo, el grado de severidad de las mismas y sus consecuencias sobre el proceso de perforación dependen del diseño de la parte inferior de la sarta (aparejo de fondo). De la formación perforada y en gran medida de la elección de los parámetros de perforación sobre todo el peso en la barrena (WOB) y la velocidad rotacional de la sarta y de la barrena. La aplicación de técnicas de análisis dinámico y de control en un sistema de perforación puede llevar a conclusiones que permitan la propuesta de estrategias y recomendaciones de operación para el perforador.

Reducción de las oscilaciones de atascamiento-deslizamiento. El modelo resultante de la sarta considerando el control definido por la acción de control PID se representa en la Figura 9. Este modelo, aunque es simplificado, captura los fenómenos más relevantes del comportamiento torsional de la sarta, principalmente, la aparición de las oscilaciones de atascamiento-deslizamiento dependiendo de determinadas condiciones de operación, dadas por los valores de la velocidad en la parte superior de la sarta Ω y el peso sobre barrena.

El incremento de Ω y el descenso del peso sobre barrena hace que dichas oscilaciones desaparecen esto queda reflejado en la Figura 9, se puede asegurar un rango de valores de Ω y de peso para los que aseguremos que el estado estacionario del sistema es un punto de equilibrio localmente asintóticamente estable.

Las soluciones más comúnmente usadas en campo para la reducción del fenómeno de atascamiento-deslizamiento son: el aumento de la velocidad de rotación, el descenso del peso sobre barrena, o la modificación de las características de los lodos de perforación. Algunas metodologías de control más efectivas se han propuesto para la solución de este problema, las cuales, básicamente, manipulan el par aplicado en la parte superior de la sarta.

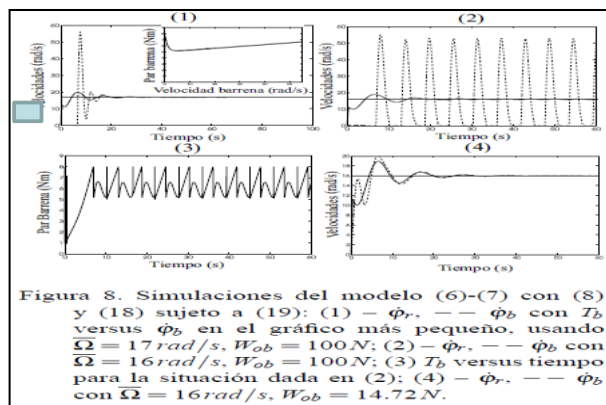


Figura 12. Simulaciones del modelo para soluciones de atascamiento-deslizamiento.

Tomado del artículo: vibraciones mecánicas en una sarta de perforación: problemas de control.

4.1.1.6.2 Diferente tipo de formación en ampliador y barrenas.

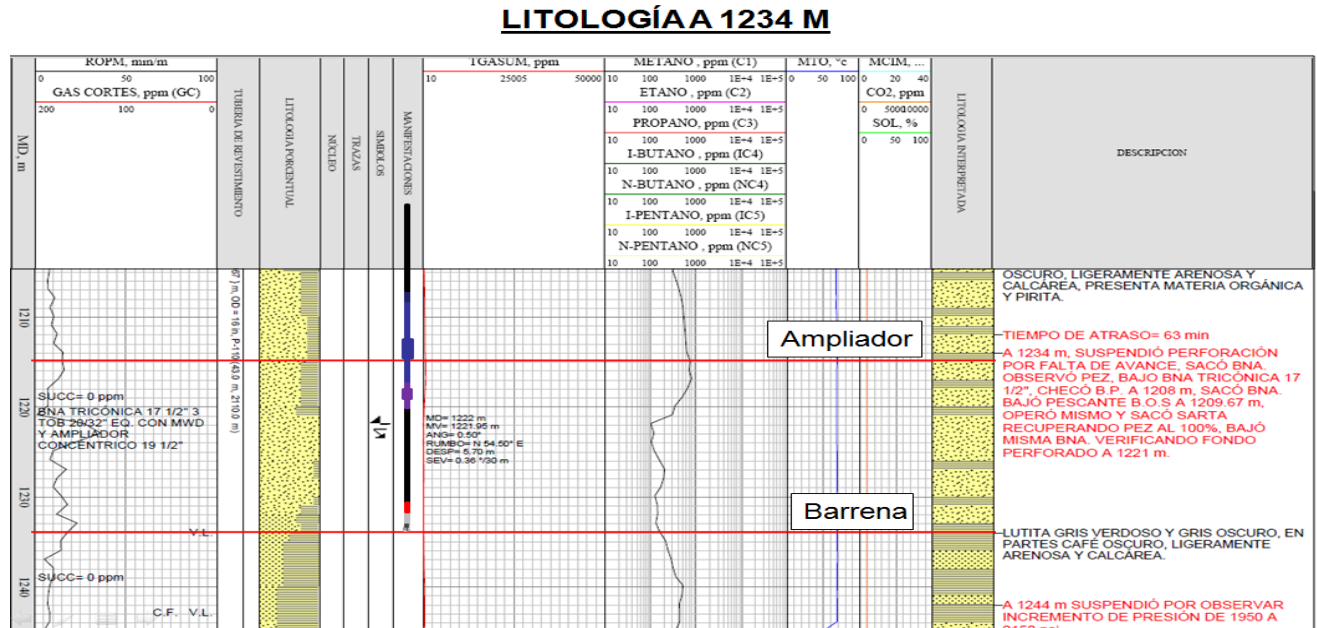


Figura 13. Se observa la litología la cual se perforó durante el primer pez, detectando posición de barrena y ampliador.

LITOLOGÍA A 1234 M

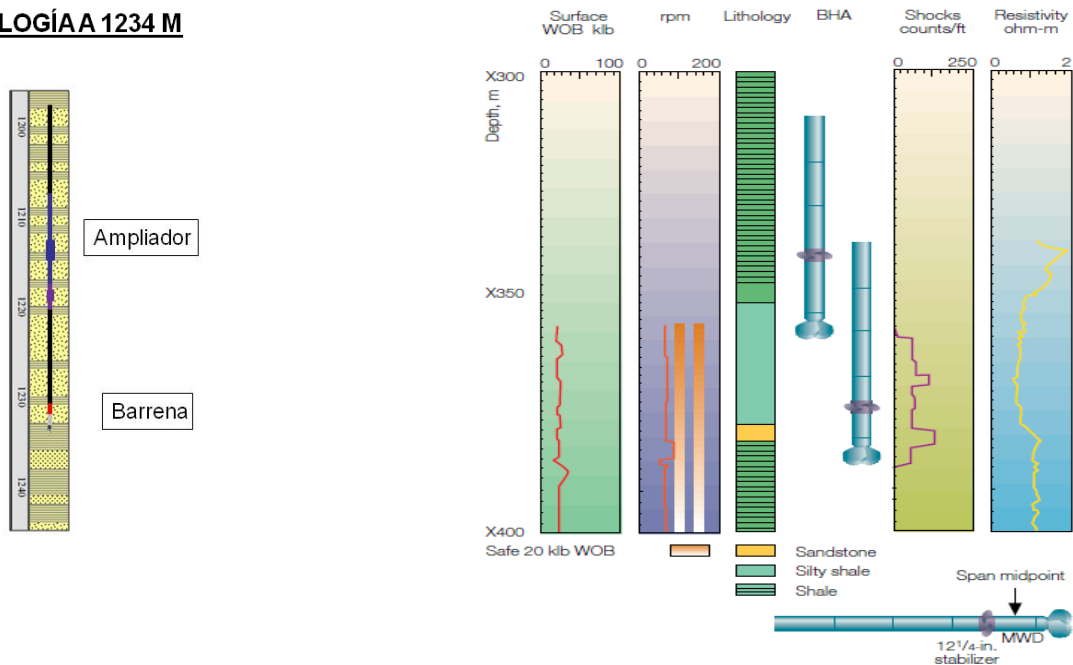


Figura 14. Se observa la litología la cual se perforó durante el primer pez, detectando posición de barrena y ampliador.

Efectos de litología sobre la vibración. En este ejemplo, se observa vibración torsional y transversal que existen en ciertos puntos de la formación. Se observa que a 358 m, que es donde está la barrena y el estabilizador se encuentra en areniscas, lo cual provoca la vibración en la sarta de perforación. Esta vibración desaparece cuando se cambia de formación a una menos agresiva como la lutita a 386 m.

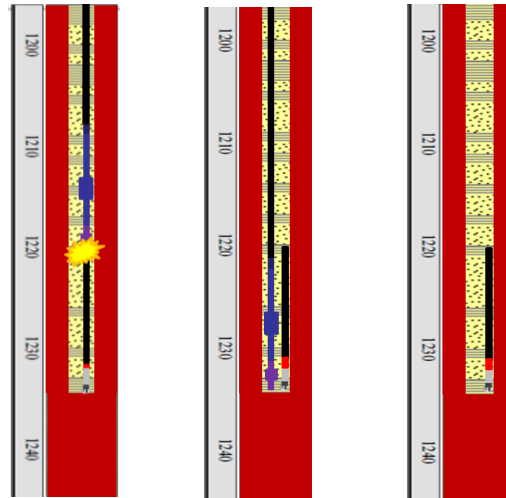


Figura 15. Se observa como los distintos cambios litológicos crean vibraciones en diferentes puntos de la sarta de perforación principalmente entre barrena y amplificador, ocasionando el rompimiento de la misma.

NATIONAL OILWELL VARCO

Sección de 17 1/2" x 19 1/2" de 725 m hasta 2120 m MD

Sección: Superior

Formación: Plioceno

Intervalo: 725 - 2120 m
 Performance: 1395 m / 75 h = 19.9 m/h

Barrena:
 Barrena PDC de 17 1/2" **RSXB16M**

- Barrena de la serie **RSR™** con anillo parolal en sus
- Aletas para mejor estabilidad de agujero
- 3 Aletas
- Cortador 10mm Raptor®

Hidráulica:
 800-900 gpm.

Objetivos:
 Optimizar el ROP. Aplicando condiciones Operación recomendadas.

Amplificador Hidro-Mecánico
Anderreamer™

Justificación: La recomendación inicial es perforar y ampliar simultáneamente con el ARR, rebajando el cemento y los accesorios en una misma corrida (ahorrando el tiempo y dinero utilizados para un viaje adicional). La herramienta a utilizar sería un ARR Shoe Drilller de 17 1/2" x 19 1/2". La activación de la herramienta se realiza por medio de una canica de acero y estará configurada con una tobera de 8/32" razón por la cual es necesario utilizar una válvula contrapresión tipo FLAPPER por encima del amplificador.

RSR816M

Anderreamer Hidro-Mecánico

Record de Barrenas

NO	FECHA	TIPO	PROFUNDIDAD (m)	TIEMPO (h)	VELOCIDAD (m/h)	PROFUNDIDAD (m)	TIEMPO (h)	VELOCIDAD (m/h)	PROFUNDIDAD (m)	TIEMPO (h)	VELOCIDAD (m/h)
1	12/15/11	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
2	12/16/11	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
3	12/17/11	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
4	12/18/11	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
5	12/19/11	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
6	12/20/11	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
7	12/21/11	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
8	12/22/11	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
9	12/23/11	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
10	12/24/11	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
11	12/25/11	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
12	12/26/11	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
13	12/27/11	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
14	12/28/11	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
15	12/29/11	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
16	12/30/11	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
17	12/31/11	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
18	1/1/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
19	1/2/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
20	1/3/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
21	1/4/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
22	1/5/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
23	1/6/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
24	1/7/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
25	1/8/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
26	1/9/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
27	1/10/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
28	1/11/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
29	1/12/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
30	1/13/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
31	1/14/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
32	1/15/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
33	1/16/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
34	1/17/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
35	1/18/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
36	1/19/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
37	1/20/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
38	1/21/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
39	1/22/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
40	1/23/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
41	1/24/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
42	1/25/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
43	1/26/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
44	1/27/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
45	1/28/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
46	1/29/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
47	1/30/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
48	1/31/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
49	2/1/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
50	2/2/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
51	2/3/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
52	2/4/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
53	2/5/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
54	2/6/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
55	2/7/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
56	2/8/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
57	2/9/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
58	2/10/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
59	2/11/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
60	2/12/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
61	2/13/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
62	2/14/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
63	2/15/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
64	2/16/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
65	2/17/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
66	2/18/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
67	2/19/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
68	2/20/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
69	2/21/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
70	2/22/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
71	2/23/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
72	2/24/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
73	2/25/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
74	2/26/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
75	2/27/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
76	2/28/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
77	2/29/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
78	2/30/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
79	3/1/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
80	3/2/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
81	3/3/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
82	3/4/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
83	3/5/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
84	3/6/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
85	3/7/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
86	3/8/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
87	3/9/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
88	3/10/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
89	3/11/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
90	3/12/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
91	3/13/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
92	3/14/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
93	3/15/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
94	3/16/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
95	3/17/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
96	3/18/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
97	3/19/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75	19.9
98	3/20/12	ARR	725	75	19.9	725	75	19.9	725	75</	

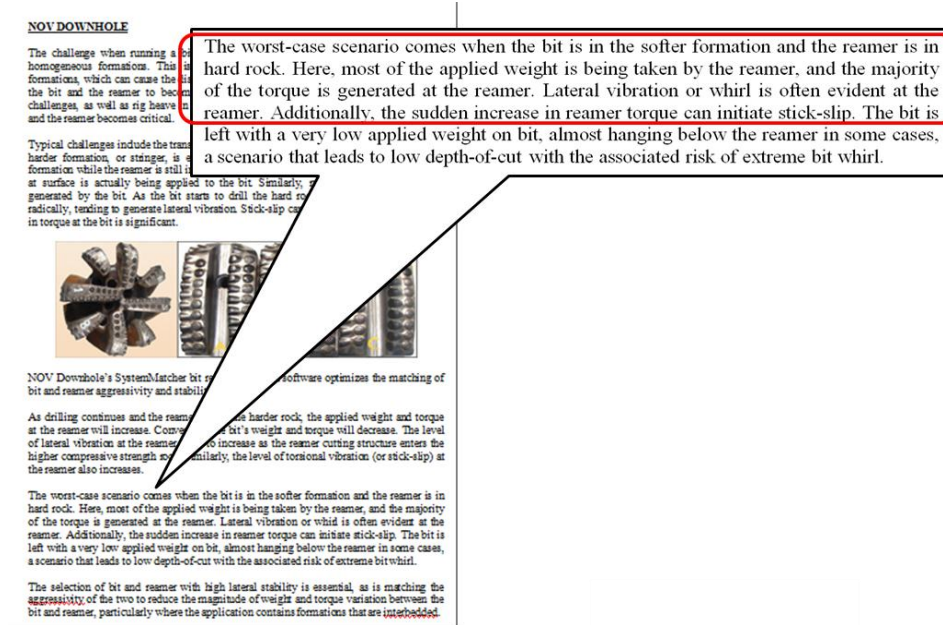


Figura 17. Artículo del ampliador el cual explica las condiciones de trabajo en formación dura y blanda.

El peor escenario viene cuando la barrena está en una formación blanda y el ampliador está en una formación dura. Aquí, el peso que más se aplica esta siendo tomado por el ampliador, y esto genera un mayor torque en el mismo. La vibración lateral es evidente en el ampliador. Adicionalmente el torque incrementa en el ampliador cuando inicia el fenómeno de deslizamiento-atascamiento. La barrena tiene muy poco peso aplicado, ocasionando que prácticamente la barrena este en el aire en algunos casos, un escenario el cual nos dice que de acuerdo a la profundidad de corte y asociado con la formación incrementa el riesgo de dejar un pez.



Figura 18. Fotografía del ampliador, donde se observa daño por contacto de metal.



Figura 19. Fotografía del estabilizador, donde se observa daño por contacto de metal.

4.1.1.6.3 Arreglo inadecuado de la sarta de perforación.

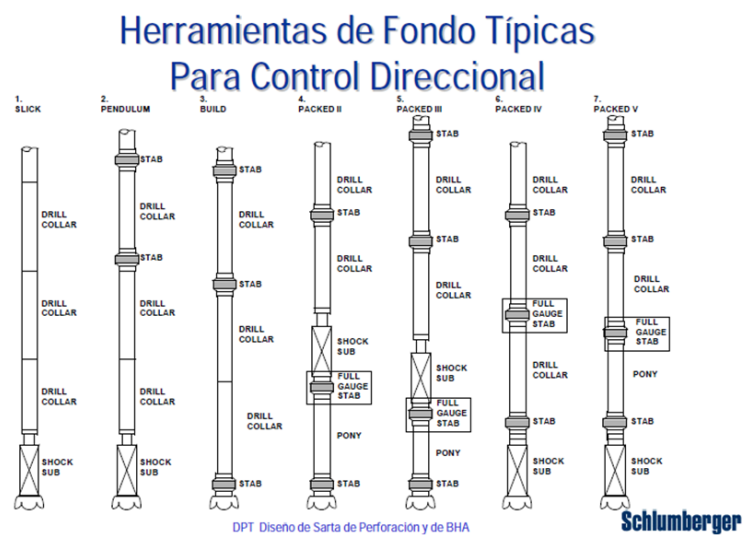


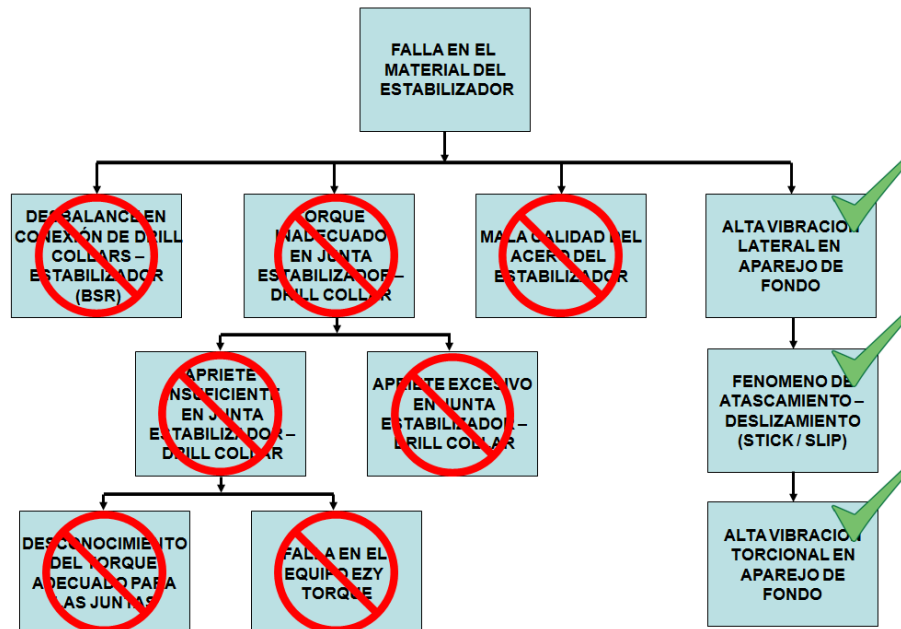
Figura 20. Tomado del Programa de Entrenamiento Acelerado para Supervisores "Diseño de Sargas de Perforación y de Herramientas de Fondo". Cia. Schlumberger .

Estabilizadores.

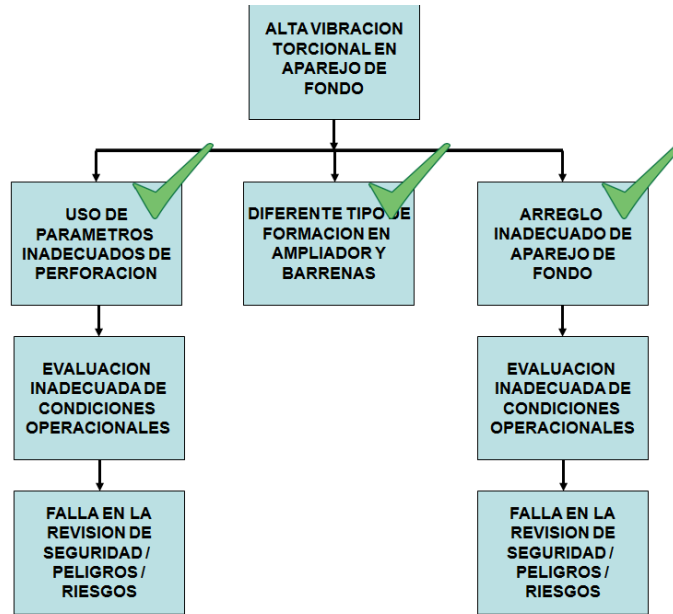
Razones para usar estabilizadores:

- 1.- Se usan como el método fundamental para controlar el comportamiento direccional de la mayoría de las herramientas de fondo.
- 2.- Ayudan a concentrar el peso de la herramienta de fondo sobre la barrena.
- 3.- Reducen al mínimo el doblamiento y las vibraciones que causan el desgaste de los acoples y dañan los componentes de la herramienta de fondo tales como los MWDs.
- 4.- Reducen el torque de perforación al evitar que haya contacto del Drill Collar con las paredes del pozo y los mantiene concéntricos dentro del agujero.
- 5.- Ayudan a evitar el que la tubería se pegue por presión diferencial y también la formación de asientos de llave.

4.1.2 Árbol Lógico.



Esquema 1. Esquema final del análisis causa raíz primer pez, 1234 m.



Esquema 2. Esquema final del análisis causa raíz primer pez, 1234 m. Conclusión por alta vibración.

4.2 Análisis causa raíz segundo pez a 1272 m, Pozo Exploratorio Chaya 1 A.

DIVISION SUR U. O. COMALCALCO

06/04/2011 Proyecto PIN-PTE ACTIVO REGIONAL EXPLORACION SUR

PEMEX EXPLORACION PRODUCCION DIVISION SUR U. O. COMALCALCO

Reporte Diario de Operaciones 06/04/2011 Proyecto PIN-PTE ACTIVO REGIONAL EXPLORACION SUR

Equipo	Operador	Profundidad	Velocidad	Presión	Temperatura	Observaciones
305

Operación	Pozo: CHAYA 1 A (EXP)
0:00-5:00	(N) CON BNA. 17 1/2" PDC Y SARTA ORIENTADA CON AMPLIADOR CONCENTRICO 17 1/2" X 19 1/2" PERFORO AMPLIANDO AGUJERO A 1272 M. SUSPENSIÓN POR OBS. CAIDA DE PRESION DE 2.750--2250 PSI Y PERDIDA DE PESO DE 73--69 TONS. PROCED. 223-21100-PO-411-0110 Y A ST. REVISO BBAS. E INDICADOR DE PESO. BIEN. RECORD DE AMPLIADOR: 51 M/4.53 HRS/P. 5.25 (AMPLIO HASTA 1254 M).
5:00-8:00	(N) SACO EXTREMO DE SARTA ORIENTADA A SUPERFICIE, SALIENDO COMO EXTREMO SUSTITUTO DE V.C.P. 9 1/2", PIÑON LAVADO POR PRESION Y DEGOLLADO; QUEDANDO COMO PEZ; AMPLIADOR CONCENTRICO 17 1/2" X 19 1/2" (7.76 M) + ESTAB. 9 1/2" X 17 1/2" (2.52 M) + DC CON MWD (7.92 M) + UBHO 9 1/2" (0.93 M) + DOBLE CAJA LISO 9 1/2" (2.13 M) + BNA. 17 1/2" PDC (0.40 M) L Pw 21.66 M, B.P. TEORICA: 1250.30 M. *NOTA: LOS 3 LASTRABARRENAS DE 8 1/2" Y LASTRABARRENA DE 9 1/2" DE CIA. PERFOLAT SALIERON A LAS 08:00 HRS.
8:00-11:00	(P) EN ESPERA DE GRUA PNL. DE OPERACION DESMANTELO PIEZA POR PIEZA HTAS. EN PISO DE TRABAJO.
11:00-12:00	(P) PNL. DE OPERACION CON APOYO DE GRUA #80281 CIA. MENDOZA DESPEJO PISO DE TRABAJO Y MUELLE DE TUBERIA.
12:00-13:00	(P) IMPARTIO PLATICAS DE SEGURIDAD, ECOLOGIA Y OPERACION; REALIZO PREPARATIVOS PARA ARMAR PBOS 11 3/4".
13:00-16:00	(P) CONECTO PBOS 11 3/4", #752761, S-150, CON CAMPANA 16", CUÑAS DE ESPIRAL 9 1/2" Y CONTROL DE CUÑAS 9 5/8" DE CIA. WEATHERFORD. METRO A 1107 M. DONDE DETECTO RESISTENCIA.

Figura 21. Reporte oficial de PEMEX segundo pez.

4.2.1 Fractura y Lavado del piñón de sustituto.

4.2.1.1 Falla en el material del sustituto.

4.2.1.1.1 Evidencia.

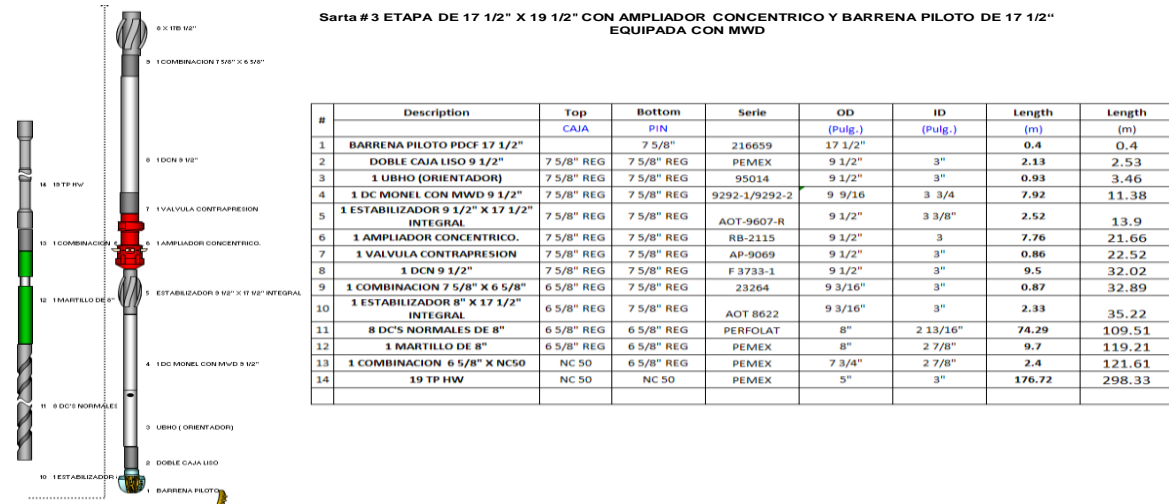


Figura 22. Se describe los componentes de la sarta de perforación para efectuar la perforación con agujero de 17 1/2" y la ampliación a 14 1/2" x 17 1/2", así como la litología a perforada.(segundo pez).

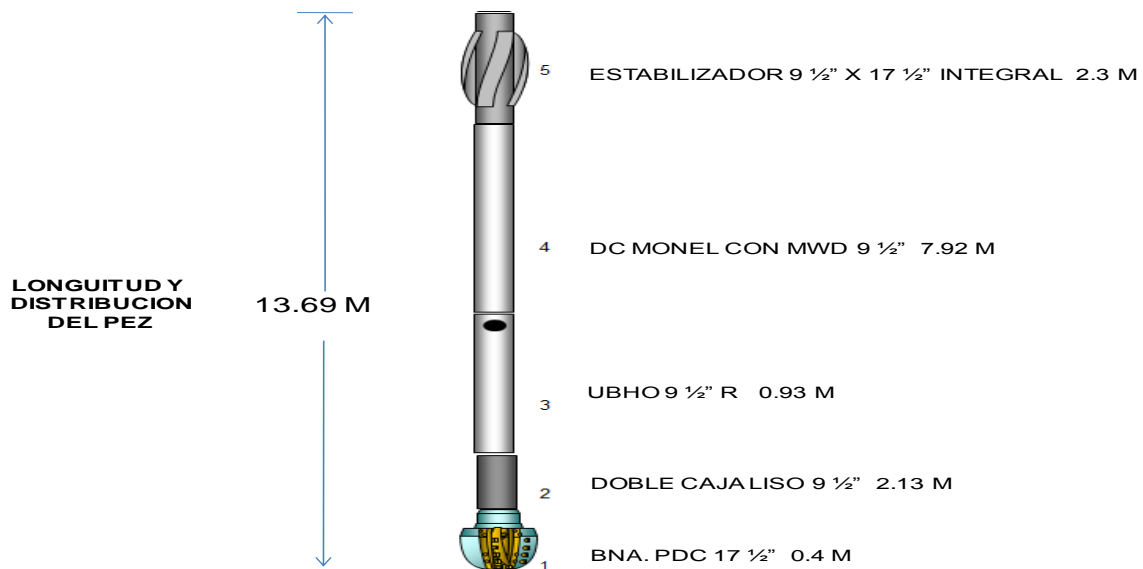


Figura 23. Se describe los componentes del pescado en la sarta de perforación para efectuar la perforación físicamente salió a superficie sarta hasta estabilizador observándose degollamiento de dicha caja, quedando como longitud de pez 13.69 m. Comprendidos desde la barrena 17 1/2" hasta el drill collar monel con mwd 9 1/2".



Figura 24. Piñón fracturado de sustituto vcp 9 1/2" (2do. pez)

4.2.1.2 Desbalance en conexión Drill Collar Estabilizador (BSR).

- 1.- Uso de sustituto de desgaste en piñón.
- 2.- No se consideró condiciones severas de operación.
- 3.- No se realizó inspección luego de ser utilizado en condiciones severas.
- 4.- Falla en los estándares de trabajo.

4.2.1.3 Alta vibración lateral en Sarta de Perforación. (Ingeniería de fatiga).

4.2.1.3.1 Evidencia.

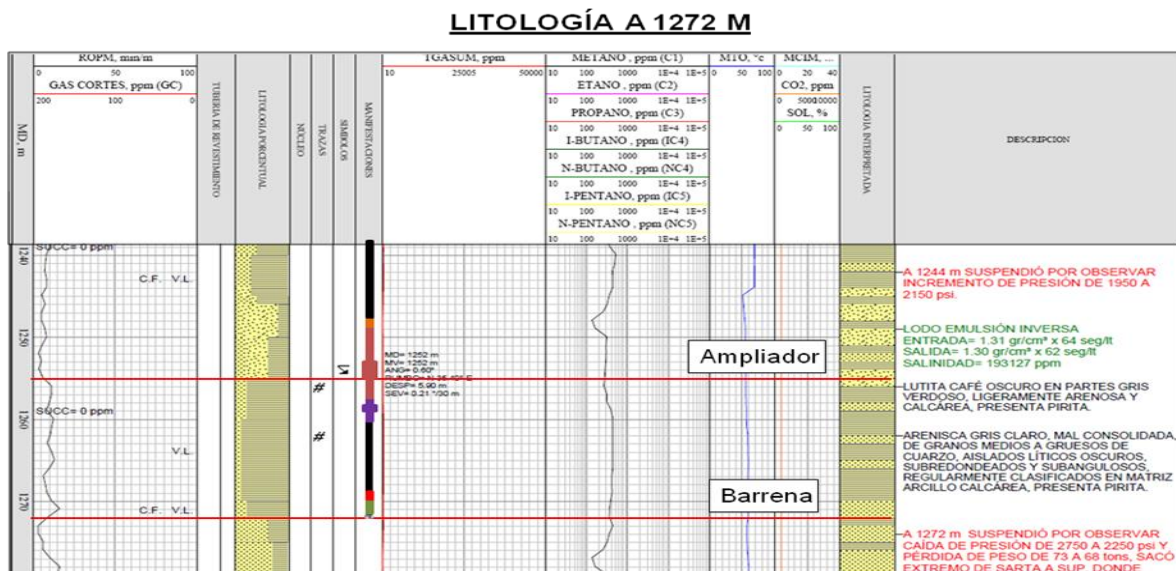
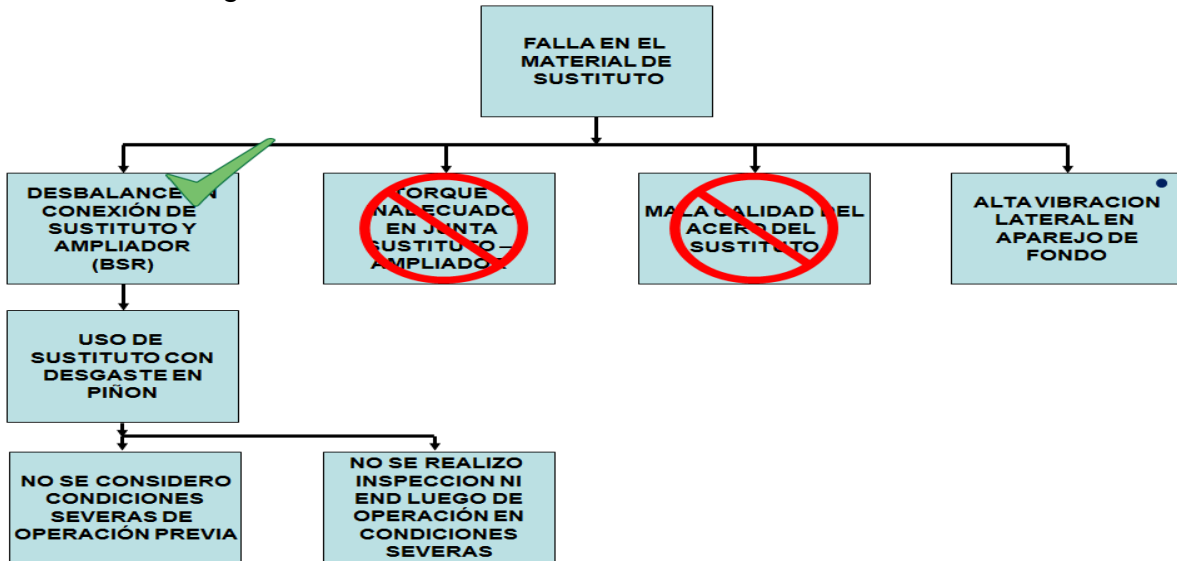


Figura 25. Se observa la litología la cual se perforó durante el segundo pez, detectando posición de barrena y amplificador.

NOTA:

De acuerdo a la evidencia presentada y tomando en cuenta las condiciones de este segundo pescado y que solo estuvo 38 m debajo del primer pez con las mismas condiciones litológicas se determinó, que fue a causa de las altas vibraciones laterales durante la perforación.

4.2.2 Árbol Lógico.



Esquema 3. Esquema final del análisis causa raíz segundo pez, 1272 m. Conclusión por alta vibración.

4.3 Análisis causa raíz tercer pez a 1397 m, Pozo Exploratorio Chaya 1 A.

PEMEX EXPLORACION PRODUCCION		DIVISION SUR U. O. COMALCALCO		SIOP	
REPORTE DIARIO DE OPERACIONES		10/04/2011		Proyecto PIN-PTE	
<p>Operación Pozo CHAYA 1 A (EXP)</p> <p>0:00-3:00 (P) CON CARGO A CIA. PERFOLAT SACO EXTREMO LIBRE A SUPERFICIE, OBSERVANDO SALIR DEG OLLADO PIÑON 7 5/8" REGULAR DEL TRANSMITTER SUB 9 5/2" X 4" DE CIA. PERFOLAT, QUEDA NDO COMO PEZ BNA. PDC HYCALOG 17 1/2" TIPO S422, LONG. 0.40 M + 01 DOBLE CAJA LISO 9 1/2" X 3", LONG. 2.13 M + 01 DRILL COLLAR MONEL 9 1/2" X 3 3/4" CON MWD Y SENSOR DE VIB RACION, LONG. 9.27 M= 11.80 M. ***PROCEDIMIENTO PE-PP-OP-002-2007 Y</p> <p>3:00-5:00 (P) CON CARGO A CIA. PERFOLAT CONECTO P.B.O.S. 11 1/4" CON CUÑAS DE ESPIRAL 9 3/8" + C ONTROL ESTANDAR + GUIA DE LABIO DE 16 1/2".</p> <p>5:00-12:00 (P) CON CARGO A CIA. PERFOLAT METIO P.B.O S. 11 1/4" X 16 1/2" X 9 3/8" A 1371.59 M, DOND E TOCO BOCA DE PEZ CON 3 TONS. ROMPIO CIRCULACION Y CIRCULO CON 313 GPM, 350PSI.</p> <p>12:00-13:00 (P) CON CARGO A CIA. PERFOLAT OPERO P.B.O.S. 11 1/4" X 16 1/2" X 9 3/8" CARGANDO 02-10 TON S. WS 59 TONS; TENSION MAXIMA 69 TONS, CARGA MAXIMA 30 TONS, EN REPETIDAS OCASIO NES, OBSERVANDO SOLTARSE EL PEZ .</p> <p>13:00-18:00 (P) CON CARGO A CIA. PERFOLAT SACO PBOS 11 1/4" A SUPERFICIE, LLENANDO CADA 5 LINGAD AS POR E.A. NOTA: SIN OBS. TRAER EL PEZ, DESMANTELO PBOS SIN OBS. HUELLA EN ENTRADA DEL PESCANTE.</p> <p>18:00-24:00 (P) CON CARGO A CIA. PERFOLAT CONECTO BNA. 17 1/2", HYCALOG TIPO 115, #LP7389 Y SAR TALISA, META A 725 M, CALIBRO VALVULA TOGGLE Y PROBO FRENO DE CORONA *****SARTA : BNA. 17 1/2", T-115, HYCALOG, #LP7389 CON 3 TOBERAS 24/32" (0.50 M) + DOBLE CAJA LISO 9 1/2" (2.04 M) + COMB 7 5/8" X 6 5/8" REG (1 M) + 3 DCN 8" (28.05 M) + MARTILLO 8" (9.70 M) + COMB 6 5/8" X NC50 (1.19 M) + 18 HW 5" (157.62 M) .</p>					

Figura 26. Reporte oficial de PEMEX tercer pez.

4.3.1 Fractura del Piñón Doble.

4.3.1.1 Falla en material Transmitter Sub.

4.3.1.1.1 Evidencias.

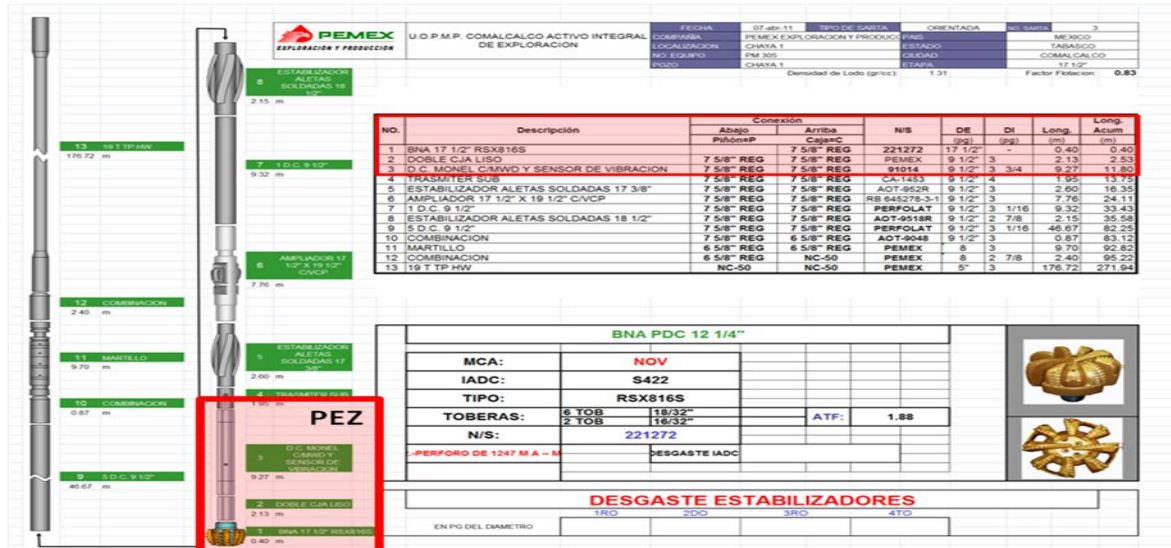
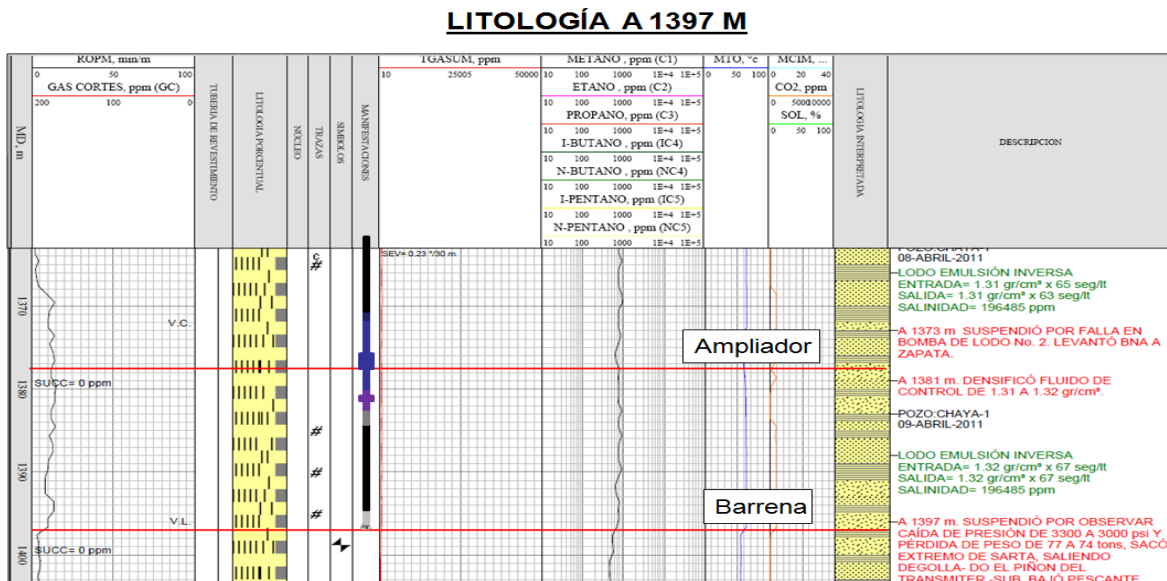


Figura 27. Se describe los componentes de la sarta de perforación para efectuar la perforación con agujero de 17 1/2" y la ampliación a 14 1/2" x 17 1/2", así como la litología a perforada.(tercer pez).



4.3.1.2 Alta vibración lateral en Sarta de Perforación. (Ingeniería de Fatiga).

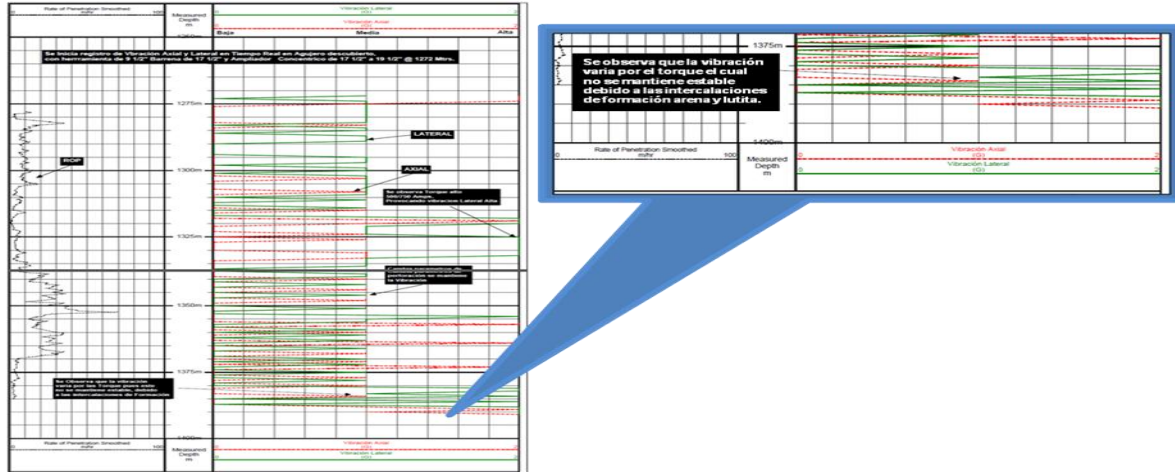
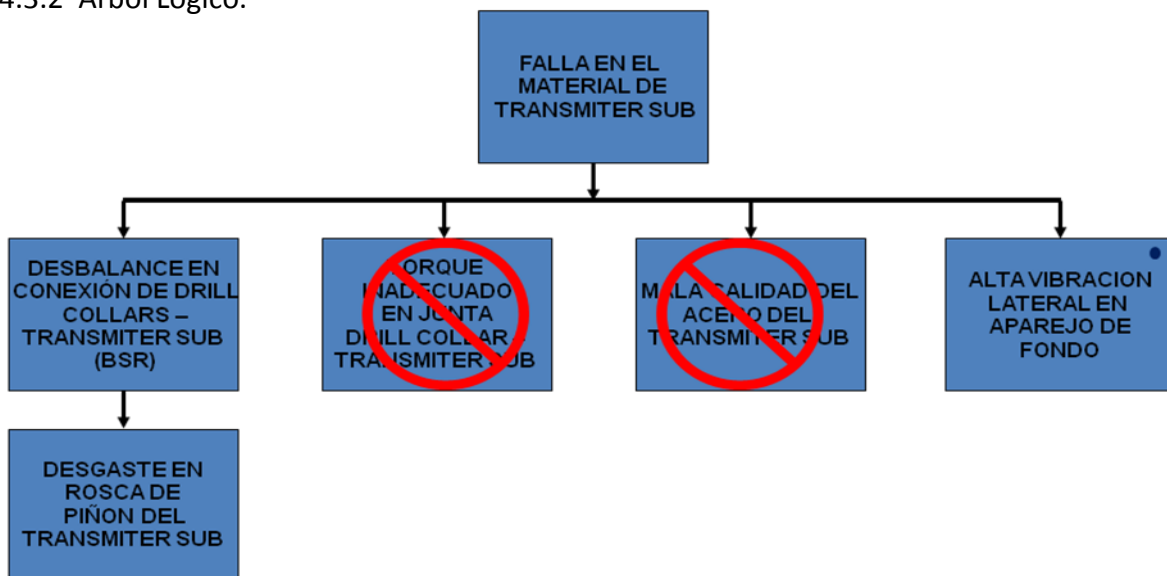


Figura 29. Parámetros de vibración en la sarta de perforación.

En la figura 29 se inicia el registro de vibración axial y lateral en tiempo real en agujero descubierto, con herramienta de Drill Collar de 9 1/2", barrena de 17 1/2" y ampliador concéntrico de 17 1/2" a 19 1/2" a 1272 m. Se observa también un alto torque de 500/750 amperes, provocando con esto vibración lateral. A la profundidad de 1325 cambió de parámetros de perforación pero se mantenía la vibración. Se observa que la vibración varía por los altos torques debido a que no se mantiene estable, ya que la formación esta intercalada (arenas-lutitas).

4.3.2 Árbol Lógico.



Esquema 3. Esquema final del análisis causa raíz tercer pez, 1397 m. Conclusión por alta vibración

4.4 Análisis causa raíz cuarto pez a 1885 m, Pozo Exploratorio Chaya 1 A.

DIVISION SUR U. O. COMALCALCO		19/04/2011		Proyecto PIN-PTE		ACTIVO REGIONAL EXPLORACION SUR	
<p>Operación Pozo: CHAYA 1 A(EXP)</p> <p>0:00-1:00 (P) SACO SARTA PENDULO (60 PIES) PARA SU REVISION A 300 M. LLENANDO POZO POR E.A. CADA 05 LINGADAS EL VOLUMEN DEL ACERO EXTRAIDO.</p> <p>1:00-6:00 (P) SACO SARTA A SUPERFICIE OBS. SALIR DEGOLLADO LA CAJA DEL PRIMER DRIL COLLAR 9 1/2" (13 CM). QUEDANDO COMO PEZ. BNA. 18 1/2" PDC HYCALOG, #210864 (0.55 M) + PTA. BNA. LISO 9 1/2" (PEMEX) (2.04 M) + DRILL COLLAR 9 1/2" (CIA. PERFOLAT) (9.27M) . LONG. PEZ= 11.86 M, BOCA DE PEZ TEORICA= 1873.14 M, DESGASTE DE ESTAB. 9 1/2" X 18 1/2" SOBRE EL 2DO. DCN - 1/2" POR ALETA, 200 ESTAB. SOBRE DCC-1/2" POR ALETA. ESTAB. 5" X 18 1/2" SOBRE CORRE-TRIP POR ALETA.</p> <p>6:00-8:00 (P) DESCONECTO DCN 9 1/2" CON APOYO DE GRUA Y BAJO A CARGADORES. .</p> <p>8:00-9:00 (P) PNAL. MANTTO. REPARO VALVULA TOOGLE DEL FRENO DE CORONA. .</p> <p>9:00-10:00 (P) DIO PLATICAS DE SEGURIDAD, ECOLOGIA Y OPERACION AL PNAL. Y ELABORO AST. .</p> <p>10:00-18:00 (P) CONECTO BNA. 18 1/2", TIPO 115 Y METIO CON SARTA PENDULO A 60 PIES A 1870 M. **N OTA: PNAL. CIA. WIFER CHECO PEDAZO DE PEZ CON DUREZA HRC-30, EL CUERPO TIENE HRC -31. .</p> <p>18:00-19:00 (P) CIRCULO Y METIO CON CIRCULACION Y ROTACION A 1873.84 M, DONDE TOCO BOCA DE PEZ. .</p> <p>19:00-21:00 (P) CIRCULO LIMPIANDO AGUJERO, CON 160 EPM, 785 GPM, 2000 PSI. .</p> <p>21:00-24:00 (P) SACA BNA. 18 1/2" A 1200 M, LLENANDO CADA 5 LINGADAS POR E.A. **PNAL. DE INSTRUMENTOS CHECO INDICADOR DE PESO, SENSOR DE PRESION DE BBEQ, ANCLA DE LA LINEA MUER TA, BBA. KOOMEY Y VALVULA DE ESTRANGULACION, BIEN, PNAL. CIA. VARCO DIO MANTTO. A TW-60.</p>							

Figura 30. Reporte oficial de PEMEX cuarto pez.

4.4.1 Fractura de caja del primer Drill Collar.

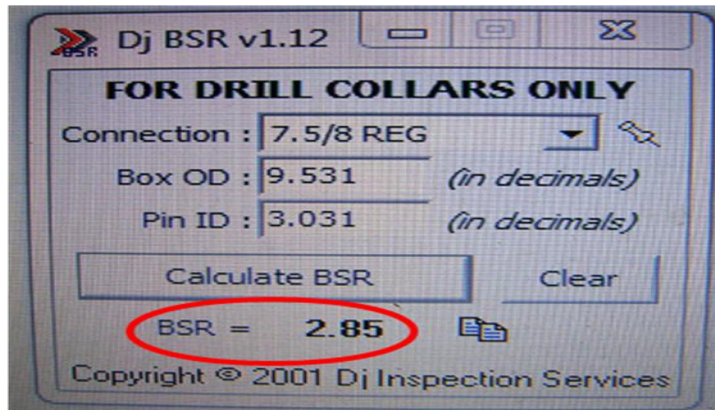
4.4.1.1 Falla en el material del Drill Collar.

4.4.1.1.1 Evidencias.



Figura 31. Drill collar 9 1/2" fracturado en su caja (4to. pez).

4.4.1.2 Desbalance en Conexión de Drill Collar.



Suministrado por Cia. Tuboscope

Figura 32. Cálculo de rigidez del Drill Collar. Verifique en primer pez cálculo de BSR.

4.4.1.3 Torque inadecuado en junta de Drill Collar.



Figura 33. Prueba de medición de torque en conexión de 9 1/2" con caja fracturada

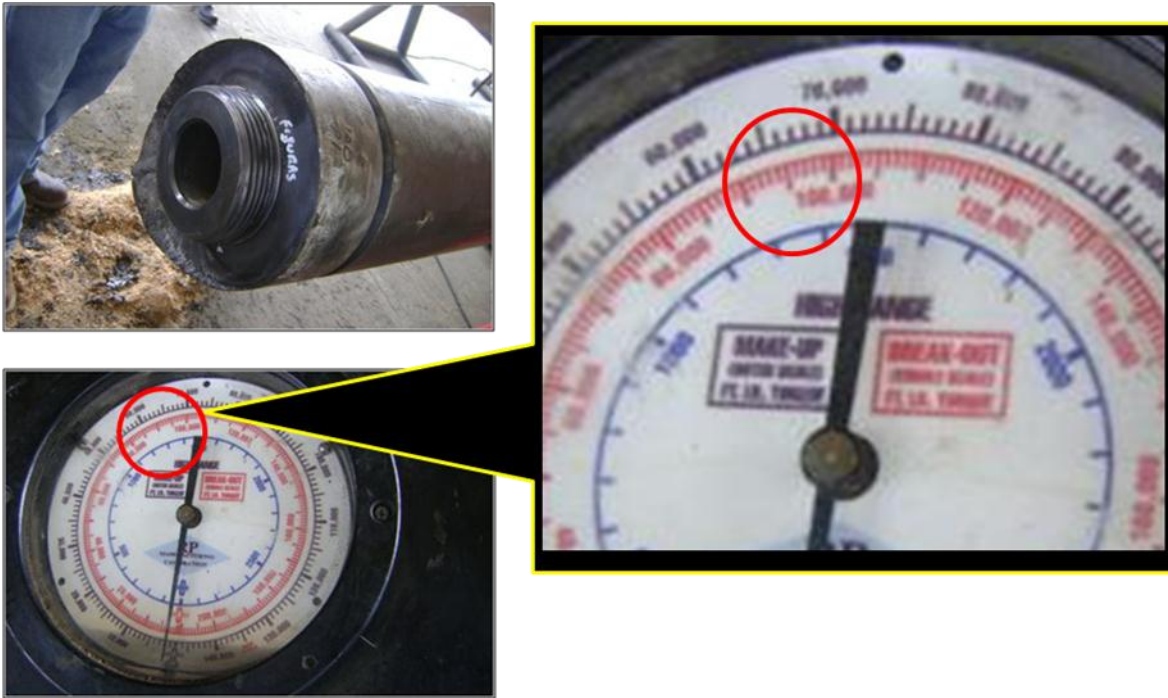


Figura 34. En estas válvulas se observa que la conexión aflojó a las 95,000 lb-ft. Pruebas efectuadas en campo.

Size and Type of Connection	Drill Collar Bore (in.)													
	OD in.	2 1/2		2 13/16		3		3 1/4		3 1/2		3 3/4		
		ft-lb	BSR	ft-lb	BSR	ft-lb	BSR	ft-lb	BSR	ft-lb	BSR	ft-lb	BSR	
NC 70	9	75,800	1.87	75,800	1.89	75,800	1.91	75,800	1.93	75,800	1.97	75,800	2.02	
	9 1/4	88,800	2.08	88,800	2.10	88,800	2.12	88,800	2.15	88,800	2.19	88,800	2.24	
	9 1/2	102,400	2.29	102,400	2.32	102,400	2.34	101,100	2.37	96,200	2.41	91,000	2.47	
	9 3/4	113,700	2.52	108,800	2.55	105,700	2.57	101,100	2.60	96,200	2.65	91,000	2.71	
	10	113,700	2.76	108,800	2.79	105,700	2.81	101,100	2.85	96,200	2.90	91,000	2.97	
	10 1/4	113,700	3.01	108,800	3.04	105,700	3.06	101,100	3.11	96,200	3.17	91,000	3.24	
NC 77	10	108,200	1.94	108,200	1.95	108,200	1.96	108,200	1.98	108,200	2.01	108,200	2.04	
	10 1/4	124,100	2.13	124,100	2.14	124,100	2.16	124,100	2.10	124,100	2.20	124,100	2.24	
	10 1/2	140,500	2.33	140,500	2.34	140,500	2.36	140,500	2.38	135,100	2.41	129,400	2.44	
	10 3/4	154,300	2.53	149,000	2.55	145,500	2.56	140,500	2.59	135,100	2.62	129,400	2.66	
	11	154,300	2.75	149,000	2.77	145,500	2.78	140,500	2.81	135,100	2.84	129,400	2.89	
CONNECTIONS WITH FULL FACES														
7 H-90 (See Note 5)	8	53,500	1.90	53,500	1.94	53,500	1.96	53,500	2.01	53,500	2.07	53,500	2.16	
	8 1/4	63,700	2.14	63,700	2.18	63,700	2.21	63,700	2.26	61,000	2.33	56,400	2.42	
	8 1/2	74,500	2.39	72,100	2.43	69,300	2.46	65,300	2.52	61,000	2.60	56,400	2.70	
7 5/8 API Regular	8 1/2	60,400	1.80	60,400	1.83	60,400	1.84	60,400	1.88	60,400	1.92	60,400	1.98	
	8 3/4	72,200	2.02	72,200	2.05	72,200	2.07	72,200	2.11	72,200	2.16	72,200	2.22	
	9	84,400	2.25	84,400	2.28	84,400	2.31	84,200	2.35	79,500	2.40	74,500	2.47	
	9 1/4	96,300	2.49	91,600	2.53	88,600	2.55	84,200	2.60	79,500	2.66	74,500	2.74	
	9 1/2	96,300	2.75	91,600	2.78	88,600	2.81	84,200	2.87	79,500	2.93	74,500	3.02	
7 5/8 H-90 (See Note 5)	9	73,000	1.76	73,000	1.78	73,000	1.79	73,000	1.81	73,000	1.84	73,000	1.88	
	9 1/4	86,000	1.95	86,000	1.97	86,000	1.99	86,000	2.02	86,000	2.05	86,000	2.09	
	9 1/2	99,500	2.16	99,500	2.18	99,500	2.20	99,500	2.23	99,500	2.27	96,300	2.31	

Figura 35. Muestra el torque recomendado para conexión Drill Collar.

4.4.1.4 Mala calidad del acero de Drill Collar.

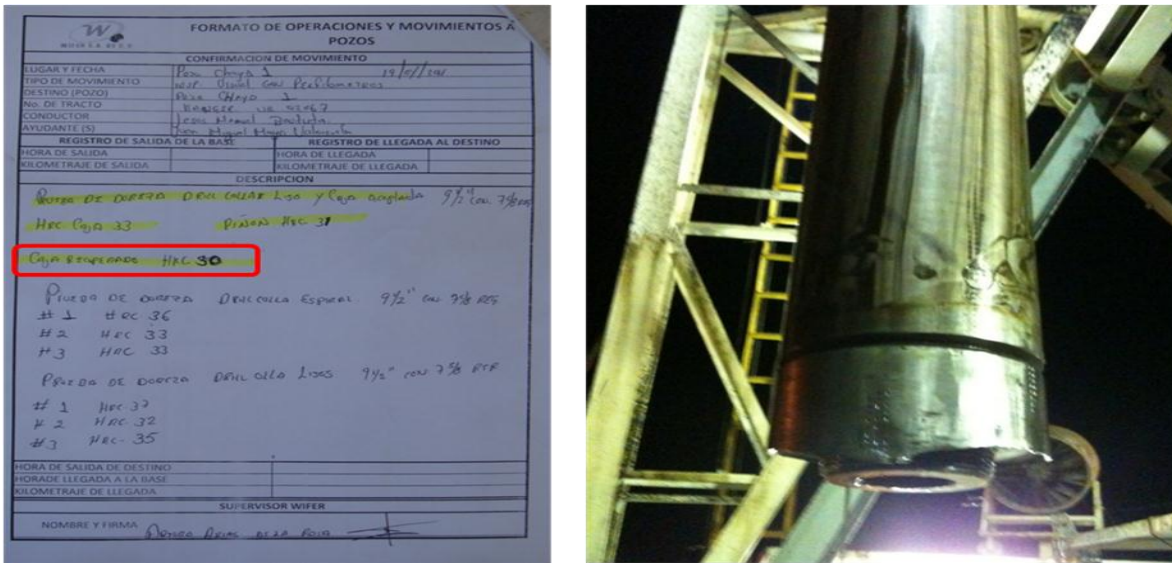


Figura 36. Imagen del Drill Collar con el pin degollado. También se muestra el grado de dureza del material.

Hardness Conversion Table

Approximate Hardness Equivalents Covering Range of Rockwell C and Rockwell B Scales

VPN	ROCKWELL SCALES															BRINELL		SCLEROSCOPE	U.T.S.	
	A	B	C	D	E	F	G	H	K	15N	30N	45N	15T	30T	45T	BHN 500kg	BHN 3000kg		Kpsi	Mpa
363	69	170	37	53						79	57	40					344	50	169	1165
354	69	109	36	52						78	56	38					336	49	165	1138
345	68	109	35	52						78	55	37					327	48	160	1103
336	68	108	34	51						77	54	36					319	47	156	1076
327	67	108	33	50						77	53	35					311	46	152	1048
318	67	107	32	49						76	52	34					301	44	147	1014
310	66	106	31	48			91			76	51	33					294	43	144	993
302	66	105	30	48			91			75	50	31					286	42	140	965
294	65	104	29	47			89			75	50	30					286	41	137	945

Table 17 — Mechanical properties and tests for new standard steel drill collars

1	2	3	4	5
Drill collar OD range	Yield strength	Tensile strength	Elongation, with gauge length four times diameter	Brinell hardness
mm	MPa min.	MPa min.	% min.	HBW min.
79.4 through 174.6	758	965	13	285
177.8 through 279.4	689	931	13	285

Tomado de API Spec 7-1 / ISO 10424

Materials Mechanical Properties			
Drill Collar Diameter	Minimum Yield Strength	Minimum Tensile Strength	Minimum Hardness
in.	psi	psi	BHN
3 1/8 thru 6 7/8	110,000	140,000	285
7 thru 11	100,000	135,000	285

Tomado de ASTM A370

Figura 37. Dureza del Drill Collar tomado de American Petroleum Institute.

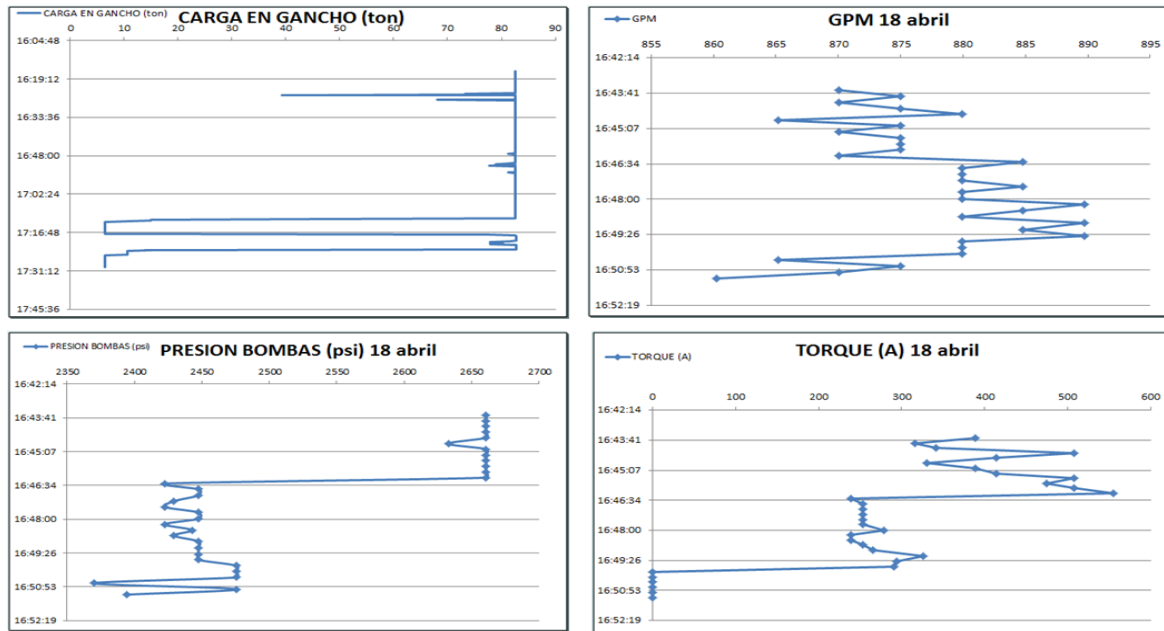
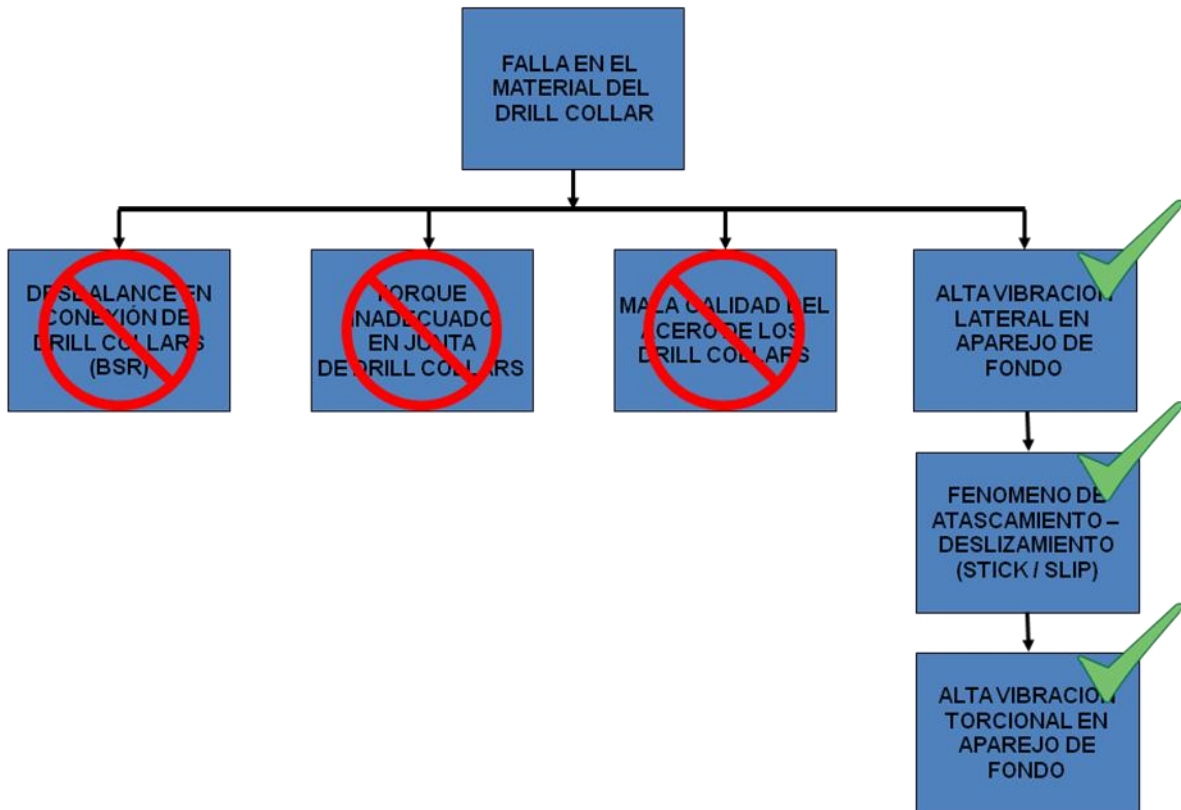


Figura 40. Se observa que en la carga al gancho tiene un peso excesivo al cual debería de tener. El galonaje de trabajo es el adecuado de acuerdo al diámetro de la barrena y el ampliador. La presión de bombas tiene una disminución indicando el probable rompimiento de la sarta de perforación. El torque incrementa de 600 a 650 amperes lo cual demuestra un torque demasiado alta para la profundidad de perforación.

Time	PROF. TOTAL (m)	POS. BLOQUE (m)	POSICION BNA (m)	INCLINACION (deg)	LAG DEPTH (m)	CARGA EN GANCHO (ton)	WOB (ton)	ROP (m/hr)	ROP (min)	PERD/GA N (m³)	PRESION BOMBAS (psi)	GPM	TORQUE (A)	EPM 01 (spm)	EPM 02 (spm)	EPMT (spm)	EMB TOTALES (spm)	RPM (rpm)	VOL PRESA 1 (m³)	VOL PRESA 2 (m³)
708 02:32:08	1852.22	6.98	1852.22	0.5	1846	77.7	7.8	9.76	6.15	9.54	2847.61	899.58	558.06	92	91	183	165272	148.6	35.69	36
709 02:32:23	1852.25	6.95	1852.25	0.5	1846	77.7	7.8	9.76	6.15	9.19	2872.41	884.83	566.95	90	90	180	165319	148.6	35.34	36
710 02:32:37	1852.28	6.92	1852.28	0.5	1846	77.7	7.8	9.76	6.15	8.83	2847.61	904.49	555.1	94	90	184	165366	148.6	34.98	36
711 02:32:52	1852.32	6.88	1852.32	0.5	1846	77.7	7.8	9.76	6.15	8.74	2847.61	904.49	578.79	93	91	184	165413	148.6	34.98	36
712 02:33:06	1852.35	6.85	1852.35	0.5	1846	77.7	7.8	9.76	6.15	8.88	2847.61	909.41	587.68	94	91	185	165452	148.6	35.34	36
713 02:33:21	1852.39	6.81	1852.39	0.5	1846	77.7	7.8	9.76	6.15	8.88	2847.61	904.49	603.23	93	91	184	165499	148.6	35.34	36
714 02:33:36	1852.43	6.77	1852.43	0.5	1846	75.3	10.2	9.76	6.15	8.52	2847.61	904.49	600.27	94	90	184	165545	148.6	34.98	36
715 02:33:51	1852.47	6.73	1852.47	0.5	1846	73.2	12.3	9.76	6.15	8.88	2872.41	899.58	591.38	92	91	183	165592	148.6	35.34	36
716 02:34:05	1852.52	6.68	1852.52	0.5	1846	74.4	11.1	9.76	6.15	9.16	2847.61	904.49	626.92	93	91	184	165639	137.99	35.62	36
717 02:34:20	1852.55	6.66	1852.55	0.5	1846	77.7	7.8	9.76	6.15	8.52	2872.41	899.58	615.08	92	91	183	165679	137.99	34.98	36
718 02:34:34	1852.6	6.6	1852.6	0.5	1846	74.4	11.1	9.76	6.15	8.52	2847.61	904.49	650.62	94	90	184	165727	137.99	34.98	36
719 02:34:49	1852.64	6.56	1852.64	0.5	1846	73.2	12.3	9.76	6.15	8.88	2872.41	899.58	662.47	92	91	183	165765	137.99	35.34	36
720 02:35:03	1852.67	6.53	1852.67	0.5	1846	77.7	7.8	9.76	6.15	8.52	2847.61	889.75	650.62	92	89	181	165813	137.99	34.98	36
721 02:35:17	1852.71	6.5	1852.71	0.5	1846	77.7	7.8	9.76	6.15	8.88	2847.61	899.58	600.23	92	91	183	165859	137.99	35.34	36
722 02:35:33	1852.77	6.44	1852.77	0.5	1846	77.7	7.8	9.76	6.15	8.88	2847.61	899.58	662.47	92	91	183	165906	137.99	35.34	36
723 02:35:48	1852.78	6.42	1852.78	0.5	1846	77.7	7.8	9.76	6.15	8.88	2865.79	899.58	615.08	92	91	183	165953	137.99	35.34	36
724 02:36:02	1852.79	6.41	1852.79	0.5	1846	77.7	7.8	9.76	6.15	8.52	2847.61	899.58	591.38	94	89	183	165992	148.6	34.98	36
725 02:36:17	1852.82	6.38	1852.82	0.5	1846	77.7	7.8	9.76	6.15	8.52	2872.41	894.66	578.79	92	90	182	166039	148.6	34.98	36
726 02:36:31	1852.85	6.35	1852.85	0.5	1846	77.7	7.8	9.76	6.15	8.88	2872.41	909.41	578.79	94	91	185	166085	148.6	35.34	36

Figura 41. Se observa en forma de números los datos obtenidos a través de las gráficas de carga al cancho, galonaje, presión de bombas y torque.

4.4.1.2 Árbol Lógico.



Esquema 4. Esquema final del análisis causa raíz tercer pez, 1397 m. Conclusión por alta vibración



Esquema 5. Esquema final del análisis causa raíz tercer pez, 1397 m. Conclusión por alta vibración

Causas Raíces Físicas:

- Alta vibración torsional en aparejo de fondo.
- Desbalance en conexión de sustituto y amplificador (BSR).

Causas Raíces Humanas:

- Uso de parámetros de perforación inadecuados por evaluación inadecuada de condiciones operacionales.
- Arreglo inadecuado del aparejo de fondo por evaluación inadecuada de condiciones operacionales.
- Uso de sustituto sin considerar condiciones severas de operación previa.
- No se realizó inspección ni END al sustituto luego de operación en condiciones severas.

Causas Raíces Sistema:

- Falla en la revisión de seguridad / peligros y riesgos.
- Falla en los estándares de trabajo.

4.5 Pozo Exploratorio Bricol 2DL, Aplicación de la Ingeniería de Fatiga.

Un número de aplicaciones en México son documentadas donde esta herramienta de ampliación excéntrica ha sido utilizada en diferentes campos y en diferentes condiciones. La ampliación del agujero disminuye la vibración y los daños mecánicos a la herramienta y barrena piloto, siempre y cuando se perfore la misma litología. La sarta de perforación con amplificador excéntrico fue introducida para reducir la vibración y extender la vida del BHA. En algunas aplicaciones el amplificador fue ocupado específicamente en el diseño de la sarta de perforación para distribuir los daños de las vibraciones armónicas. Para afinar los parámetros recomendados se utilizó el software de análisis de elementos finitos que fue utilizado para el comportamiento de modelos armónicos de la sarta de perforación. Cabe mencionar que en el proyecto de este pozo en todas las secciones se aplicó la Ingeniería de Fatiga.

La introducción de esta herramienta excéntrica en México fue el resultado para disminuir la vibración y extender la perforación y por lo tanto la vida de la barrena.

El Pozo Exploratorio Bricol 2DL fue perforado en México en la unidad operativa comalcalco en el estado de Tabasco, en el sureste del Golfo de México. Las formaciones consistentes de conglomerados, arenas, dolomías duras, areniscas, lutitas, las cuales se perforó con el ampliador excéntrico, donde en la figura 39 se muestra el master log, de la litología perforada. Esto provee múltiples cambios para la ampliación del agujero, con excesivas vibraciones laterales causando daños severos y prematuras fallas en la barrena.

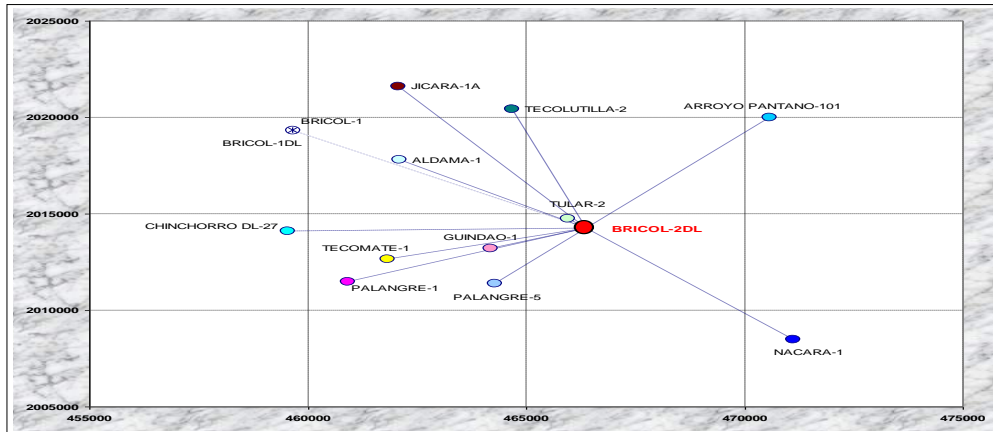


Figura 42. Localización del Pozo Exploratorio Bricol 2DL, mostrando los pozos de correlación.

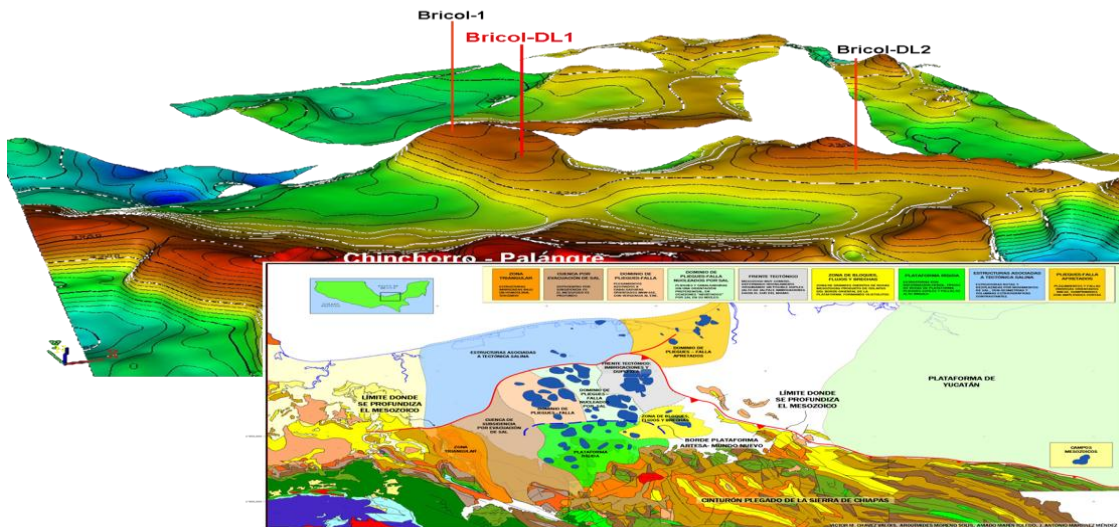


Figura 43. Localización del Pozo Exploratorio Bricol 2DL. Se encuentra ubicado en la Región Sur de México en el estado de Tabasco, perteneciente al municipio de Comalcalco.

La corrida de este pozo utilizó una barrena piloto de 10 5/8" y el ampliador excéntrico de 14 1/2" x 17 1/2". El plan para la ampliación en esta sección del pozo fue perforar y ampliar simultáneamente. Figura 44.



CANT	DESCRIPCION	B.E. (PG)	D.L (PG)	LONG. (M)	LONG. ACUM. (M)
1	Barrena	22.750		0.25	
1	Double Caja I. Ica - OD	8.000	3.000	1.39	1.64
1	WSP#10	8.000	3.5	5.57	7.21
1	Motor	8.000	3.5	9.29	16.5
1	AMM Transmisor sub	8.000	3.5	1.85	18.35
1	Estabilizador #10 5/8"	8.000	2.813	1.86	20.21
1	Drill Collar Corto	8.000	2.875	2.38	22.59
1	Estabilizador #10 5/8"	8.000	2.813	1.74	24.33
1	AMPLIADOR EXCENTRICO	8.000	3.000	1.97	26.3
1	VCP	9.500	3.000	0.82	27.12
1	9-1/2" Drill Collar	9.500	3.000	0.36	27.48
1	9-1/2" Estabilizador 9x14.5"	9.500	3.000	1.99	29.47
1	9-1/2" Drill collar	9.500	3.000	0.37	29.84
1	Xover - OD 8.00"	8.000	2.813	0.76	30.60
9	4" Drill collar	8.000	2.813	8.38	38.98
1	Martillo	8.000	2.813	4.18	43.16
1	Combinacion	5.000	3.000	2.82	45.98
12	5" XPS 50.000 - Range 2	5.000	3.000	174.50	220.22
30	5" Drill Pipe 19.500 - E - Premium	5.000	4.276	719.35	939.57
100	5" Drill Pipe 19.500 - X95 - Premium	5.000	4.276	855.43	1795
100	5" Drill Pipe 19.500 - G105 - Premium	5.000	4.276	827.59	2622.59
1	5" Drill Pipe 19.500 - S135 - Premium	5.000	4.276		3150

DIMETRO BARRERA	Plato 10.56" Ampliador 14 1/2" x 17 1/2"
TIPO	PDC (REX T161) Escarabajo
ANILLO	REED HYCALDO
NUM. ALETAS (DAM. CORTADORES)	7 ALETAS, CORT. 16 mm Y 11 FILCUTACE mm, 4 FLDT RIMMERS 13 mm.
TUBERIAS	PILOTO 320 320 124 y AMPLIADOR 320
AREA DE FLUJO	1.745
DESGASTE MAD	
DESGASTE ESTABILIZADORES	
DIRECCIONAL INICIO	3000
DIRECCIONAL FINAL	

DISEÑO E INGENIERIA DE POZOS

Figura 44. Se describe los componentes de la sarta de perforación para efectuar la perforación con agujero piloto de 10 5/8" y la ampliación a 14 1/2" x 17 1/2", así como la litología a perforada.

PROF. INICIAL (M) / PROF. FINAL (M):	2930- 3500 M
METROS AMPLIADOS	570 M
HORAS ROTACION	NO
ROP PROMEDIO (MIN/M)	7.6
CONDICIONES DE OPERACION	PSB: 6-6 TON RPM: 130 TORQUE: 500-600 AMP'S Q: 700 GPM; P: 3700 PSI
FORMACION	MIOCENO



LITOL OGIA	LUTITA GRIS CLARO Y ARENISA
------------	-----------------------------

En esta primera corrida se perforaron 1900 metros con ROP promedio de 11.7 metros por hora, una cantidad significativa de vibraciones laterales y torsionales donde fueron detectadas desde el principio de la perforación con la ayuda de los sensores de vibración colocados en la sarta de perforación, donde fueron ajustados los parámetros de perforación mitigando las vibraciones con éxito. La aplicación de la Ingeniería de Fatiga en esta sección fue el resultado de ahorro en tiempo y dinero, ya que al término de esta sección no hubo pescados. La barrena piloto al terminar de perforar no mostró daños severos en la estructura de corte. La ampliadora excéntrica se observó un desgaste normal. Los estabilizadores se observaron desgastados en 1/8".

En la corrida siguiente, se utilizó una barrena y ampliador excéntrico nuevo y con el uso del vibrascope se mitigó la vibración. La operación fue suspendida por llegar al asentamiento de la tubería de revestimiento de 13 3/8" en la zona de alta presión.

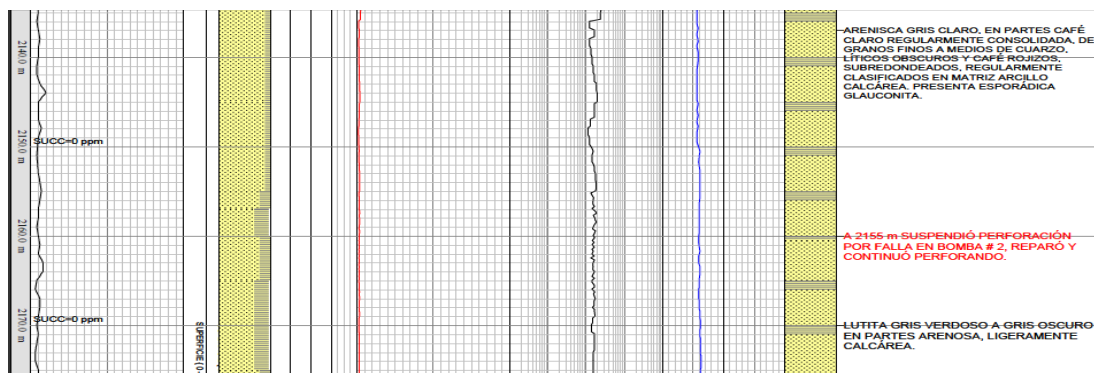
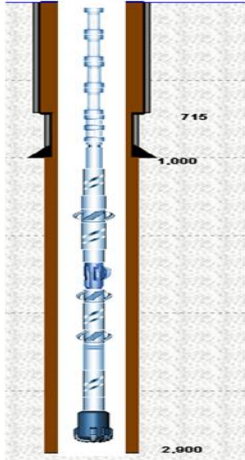


Figura 45. Master Log Pozo Exploratorio Bricol 2DL. Describe la litología perforada.



La Perforación en la etapa de ampliación con herramienta excéntrica de 14 1/2" x 17 1/2" en formación 100 % arenisca, se efectuó un **récord único a nivel mundial**, donde se tuvo un ahorro de 21 días en tiempo y costo por equipo. Técnica la cual se utilizó posterior en distintos pozos.

TIEMPO PROGRAMADO	TIEMPO REAL	AHORRO
50 DIAS	29 DIAS	21 DIAS

COSTO PROGRAMADO	COSTO REAL	AHORRO
\$ 77,176,713	\$ 65,082,778	\$ 12,093,935

Figura 46. Con la barrena excéntrica se efectuó un record único a nivel mundial, donde se obtuvo un ahorro significativo en tiempo y costo.

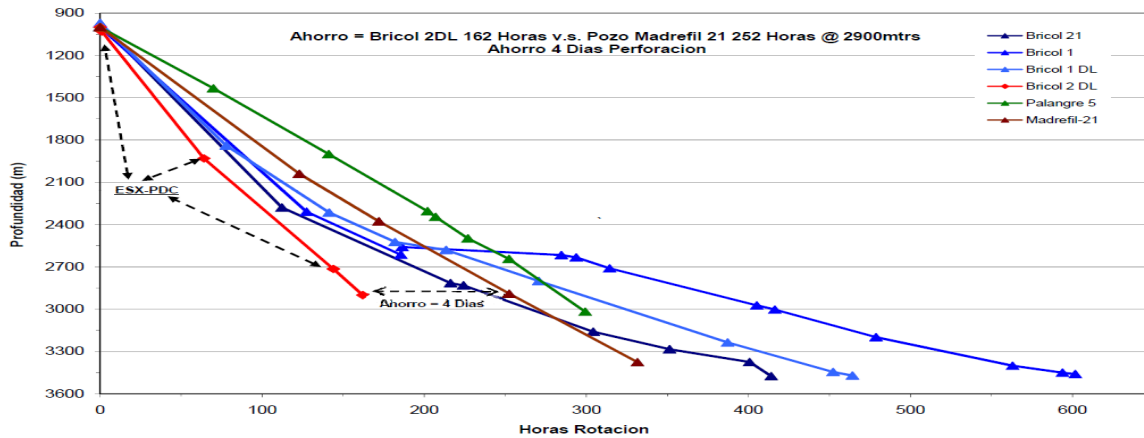


Figura 47. Se muestra un comparativo en días con los pozos de correlación, donde se obtuvo un ahorro de 4 días durante la ampliación minimizando las vibraciones axiales, laterales y torsionales.

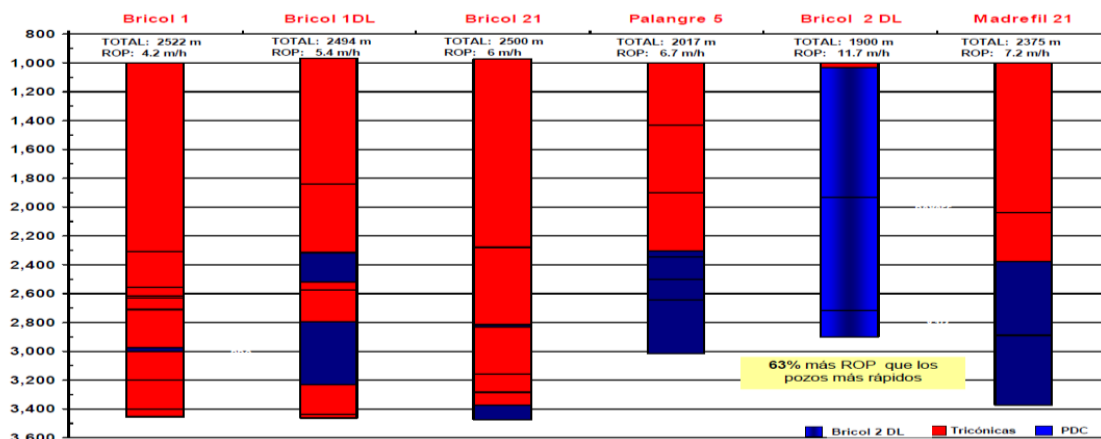


Figura 48. Se muestra un comparativo en ROP con los pozos de correlación, tanto con barrenos pdc y tricónicas donde BRICOL 2DL obtuvo un ROP de 11.7 metros por hora.

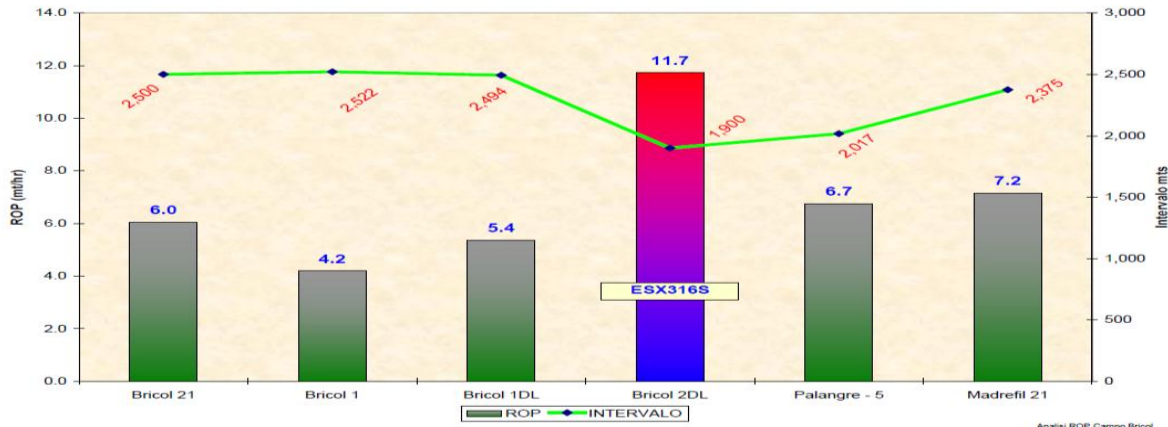


Figura 49. Se muestra un comparativo en ROP promedio con los pozos de correlación, donde BRICOL 2DL obtuvo un ROP de 11.7 metros por hora.

4.5.1 Software dinámico para el diseño de sarta (vibrascope).

El vibrascope fue empleado para hacer análisis previo a los pozos, y dar mejor resultado al aplicar la Ingeniería de Fatiga, referente al BHA, y la sarta de perforación. Este software utiliza análisis de elementos finitos (FEA), para modelar los movimientos dinámicos de la sarta de perforación e identificar combinaciones en condiciones de operación y parámetros de perforación que resultan ser fuerza axial, lateral y vibración torsional mientras se perfora. Este software entrega una recomendación de parámetros de perforación basados en una aproximación científica que minimiza el riesgo de vibración en la sarta de perforación.

Para la primera corrida, este análisis fue usado para modelar el diseño de la sarta de perforación con el amplificador excéntrico, para tratar de minimizar la vibración. Durante la corrida de todos los parámetros de perforación del Pozo Exploratorio Bricol 2 DL fueron controlados por el Ingeniero de Pozo. En una corrida posterior cuando se compararon los parámetros recomendados nuevamente con los datos actuales, se pudo observar que la sarta de perforación trabajó bajo condiciones críticas de resonancia lateral, los cuales están potencialmente contribuidas al daño del RSS (sistema rotatorio) y ESR (amplificador excéntrico). El peso sobre barrena mínimo recomendado fue de 5 toneladas para el subreamer, propiamente dentro del agujero piloto y para centralizar el agujero. El peso real utilizado fue de 1 a 3 toneladas los cuales estuvo por debajo de los niveles recomendados porque el pozo estuvo perdiendo verticalidad.

También este software tiene las ventajas de predecir, que de acuerdo a la profundidad donde se perfora que numero de RPM (revoluciones por minuto) hay que trabajar para minimizar las vibraciones laterales, axiales y torsionales.

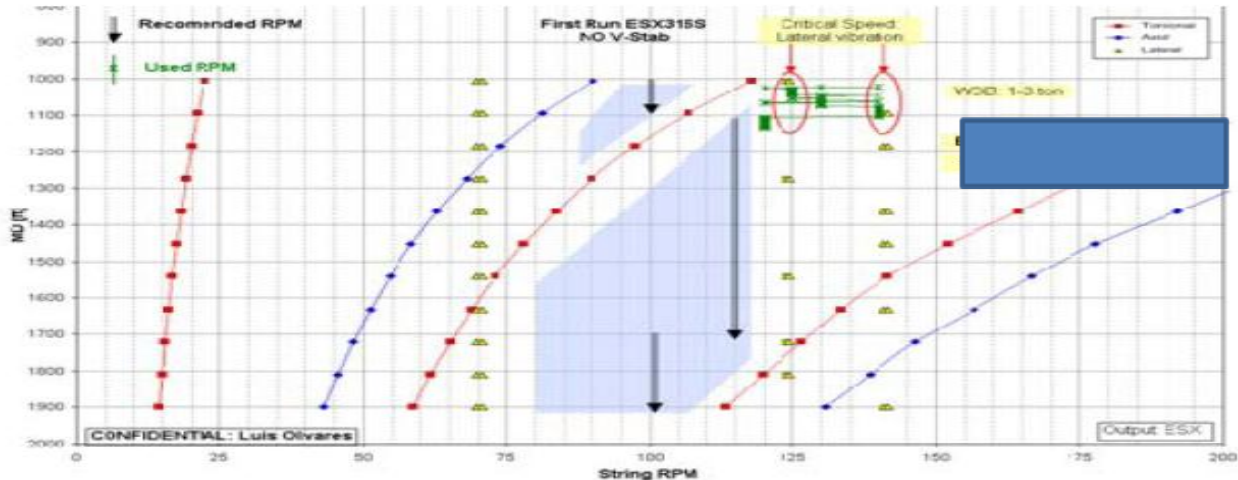


Figura 50. Se muestran los parámetros obtenidos por el vibrascope, con el peso sobre barrena y las RPM en primera corrida.

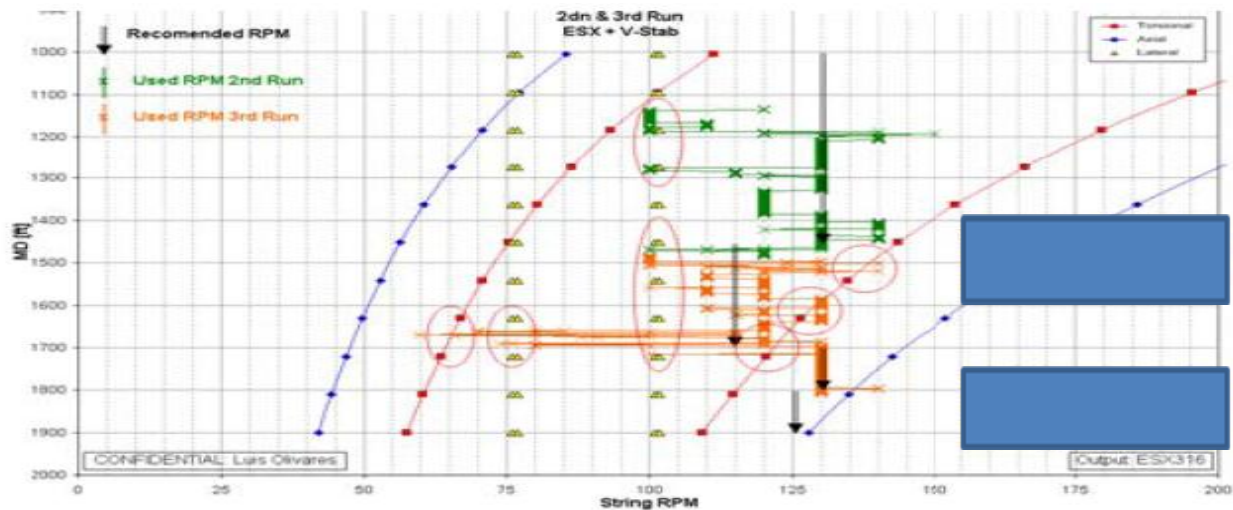


Figura 51. Se muestran los parámetros obtenidos por el vibrascope, con el peso sobre barrena y las RPM, en segunda y tercera corrida.

4.5.2 Sensores de vibración.

Los sensores de vibración son añadidos como estándar a todas las nuevas y reformadas herramientas de medición en tiempo real. Con ello se asegura que al aplicar la Ingeniería de Fatiga asegura el éxito de la perforación. Ellas consisten de 2 acelerómetros de estado sólido, ortogonalmente montado en la x (lateral) y z (axial), ejes del MWD o PWD en la tarjeta electrónica. La tarjeta electrónica monitorea los niveles de impacto medidos por los acelerómetros sobre periodos consecutivos de 16 segundos y categorizar el nivel de corriente como ser bajo, (seguro) moderado (advertencia) o alto (los daños que resultan) para ambos ejes y lecturas laterales. Normalmente la herramienta solo transmitirá lecturas a la

superficie si las últimas 2 condiciones están presentes por medio de un solo pulso al final de cada transmisión dinámica. El dato es presentado gráficamente al ingeniero de pozo en la pantalla del piso de perforación, permitiéndole monitorear la condición y apropiar cambios para los parámetros de la perforación.

Estableciendo seguridad, golpe y vibración de libre perforación ayuda a optimizar la tasa de perforación y prevenir daños a la sarta de perforación y herramientas de perforación.

En la etapa de la perforación de 12 ¼" se construyó direccionalmente tipo "J" con ángulo máximo de 38°, con una severidad de 1.5° cada 30 metros, con un desplazamiento de 1651 metros en azimut 38.18° con un inicio de desviación de 3100 m. Se muestra en la figura 46.

Durante la perforación en 12 ¼" se efectuó con un sistema direccional rotatorio (RSS), y una sarta de perforación direccional donde se aplicó la Ingeniería de Fatiga para construir y levantar ángulo, donde en la sarta de perforación se colocó los sensores de vibración para controlar la y mitigar la vibración. También se hizo uso del vibrascope en los que se pudo hacer análisis en tiempo real para monitorear los parámetros de vibración. La Ingeniería de fatiga trajo como resultado en esta sección nuevamente cero pescados.

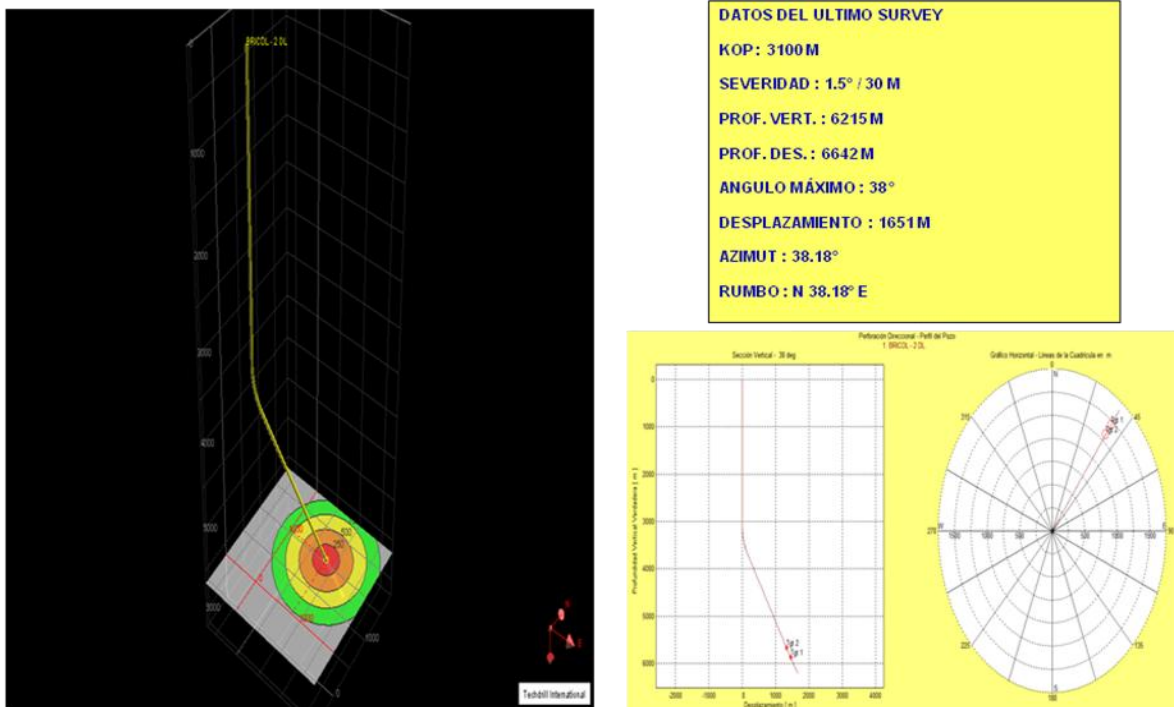
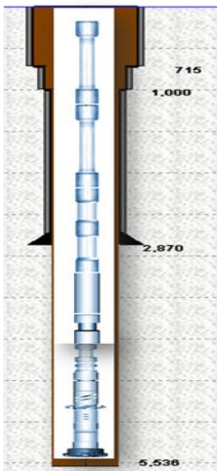


Figura 52. Presenta el análisis direccional del Pozo Exploratorio Bricol 2DL.



La perforación de 12 ¼" con barrena pdc convencional, y sarta rotatoria perforó con pérdidas parciales en distintos puntos de la formación, con de densidad de 1.96 a 2.02 gr/cc, para lo cual se estuvo colocando baches de antiperdida.

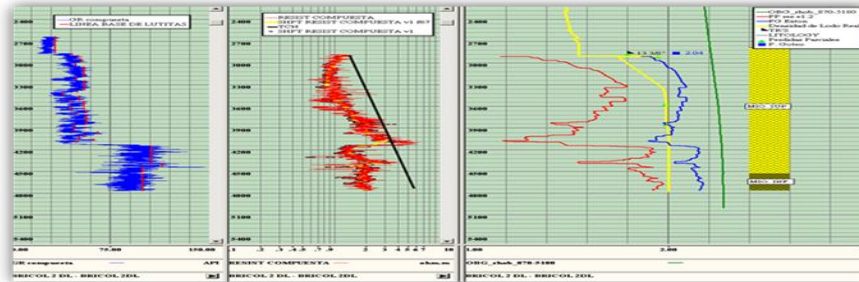
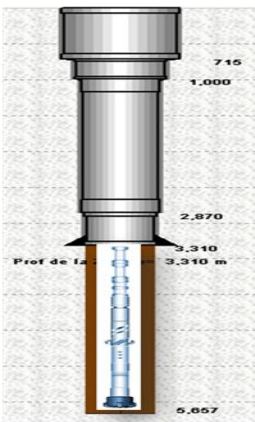


Figura 53. Se observa los gradientes de poro y fractura en la formación perforada, donde se demuestra las intercalaciones de lutita y arenisca.



La perforación de 12 ¼" con barrena pdc convencional, perforó 2244 m en 23 días, teniendo un ahorro de 10 días en tiempo y costo por equipo.

TIEMPO PROGRAMADO	TIEMPO REAL	AHORRO
50 DIAS	29 DIAS	21 DIAS
COSTO PROGRAMADO	COSTO REAL	AHORRO
\$77,176,713	\$65,082,778	\$12,093,935

Figura 54. Con la barrena pdc convencional de 12 ¼" y sarta rotatoria se obtuvo un ahorro significativo en tiempo y costo.

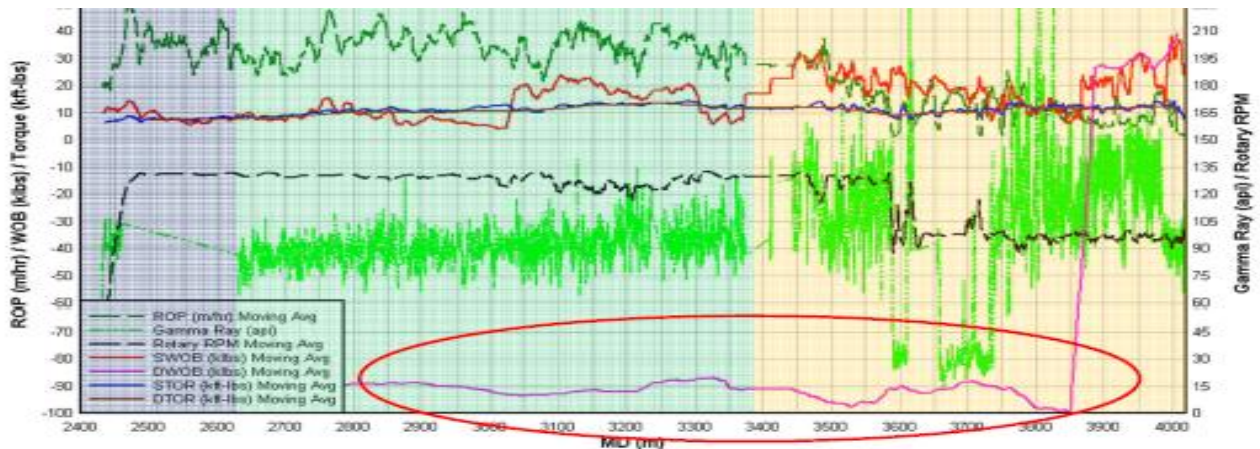


Figura 55. Con el uso de los sensores de vibración se detectó oportunamente las vibraciones torsionales generadas por el peso sobre barrena y las RPM.

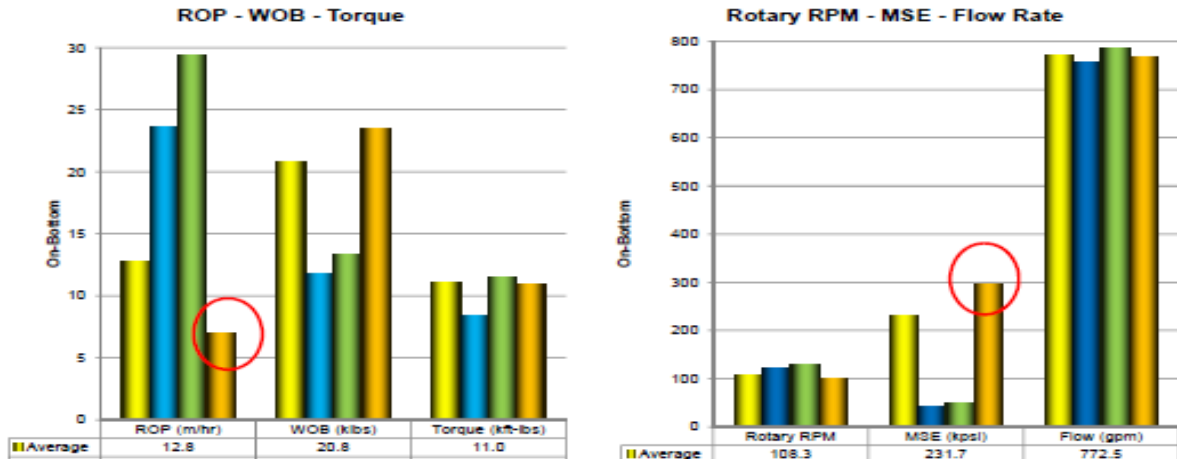


Figura 56. Se muestra en la figura del lado izquierdo el ROP promedio obtenido durante la etapa de 12 ¼", así como el peso sobre barrena (WOB) y el torque generado. Del lado derecho se observa el gasto con el que se trabajó.

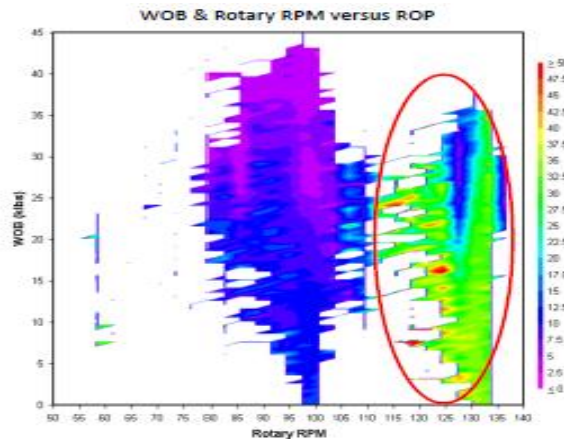


Figura 57. Se observa el WOB generado con el número de RPM y las vibraciones generadas a causa de estos parámetros, donde con el uso del vibrascope y sensores de vibración se minimizó la vibración.

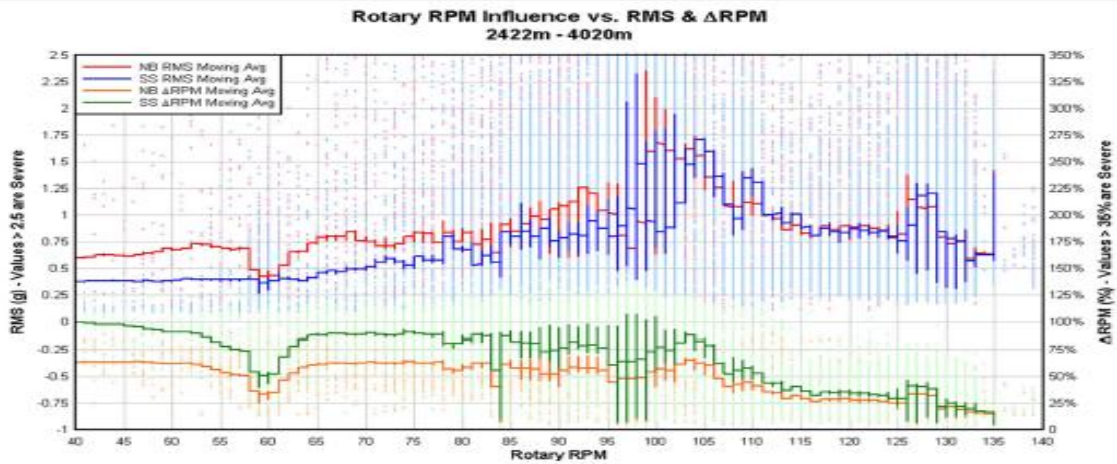


Figura 58. Se muestra la influencia generada en base al uso adecuado de las RPM para minimizar las vibraciones laterales y torsionales generadas en la sarta de perforación.

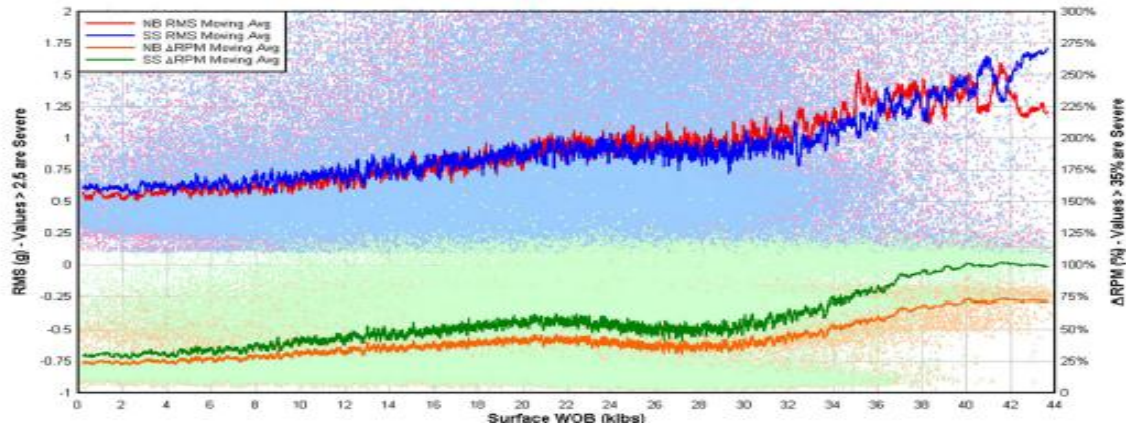


Figura 59. Se muestra la influencia generada en base al uso adecuado del WOB para minimizar las vibraciones laterales y torsionales generadas en la sarta de perforación.

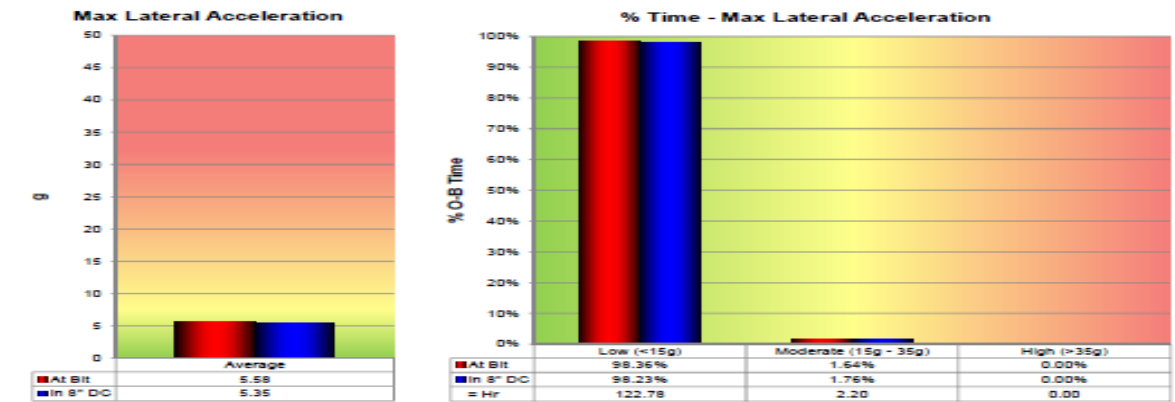


Figura 60. Se observan las vibraciones máximas laterales, donde solo hubo vibraciones bajas y moderadas en la barrena pdc de 12 ¼" y en la herramienta de drill collars de 8" generadas en la sarta de perforación.

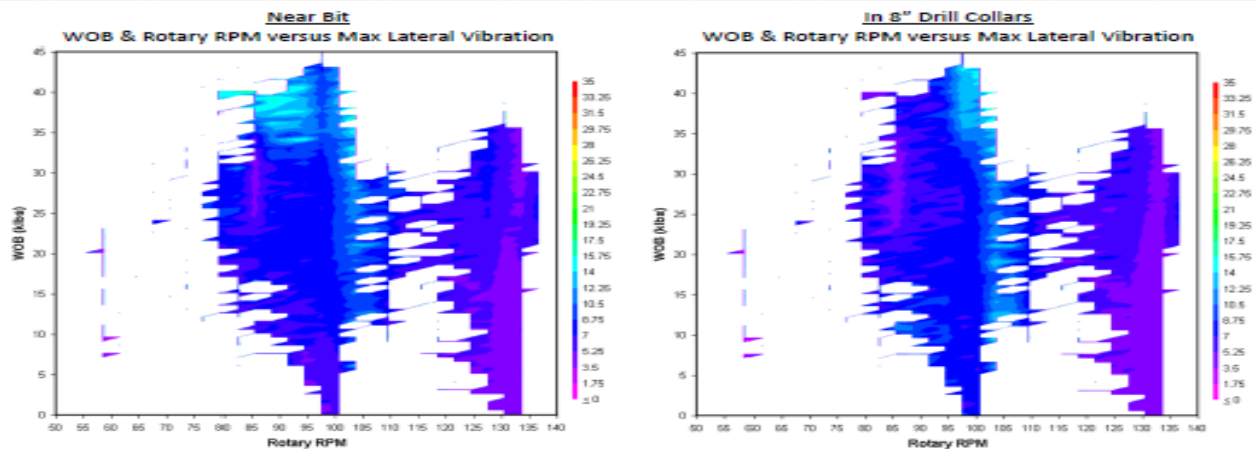


Figura 61. Se observan las vibraciones máximas laterales, en la barrena pdc de 12 ¼" y en la herramienta de drill collars de 8" de color morada, detectando mínimas vibraciones generadas en la sarta de perforación.

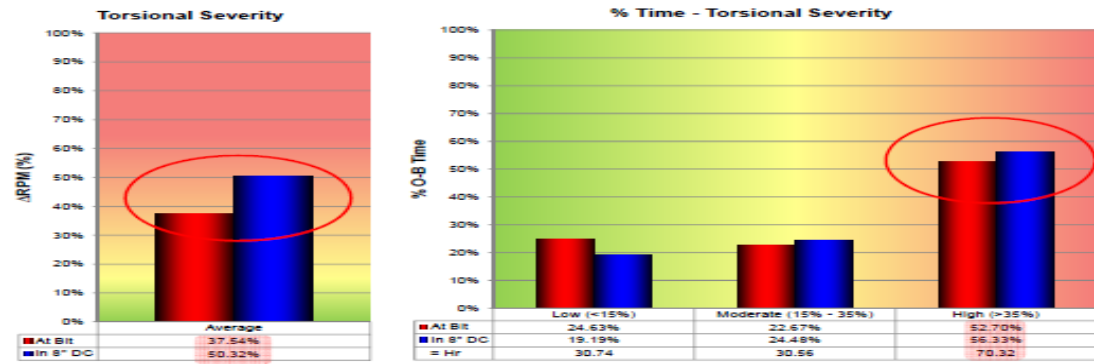


Figura 62. Se observan las severidades torsionales, en la barrena pdc de 12 1/4" y en la herramienta de drill collars de 8" de color morada, detectando mínimas vibraciones generadas en la sarta de perforación.

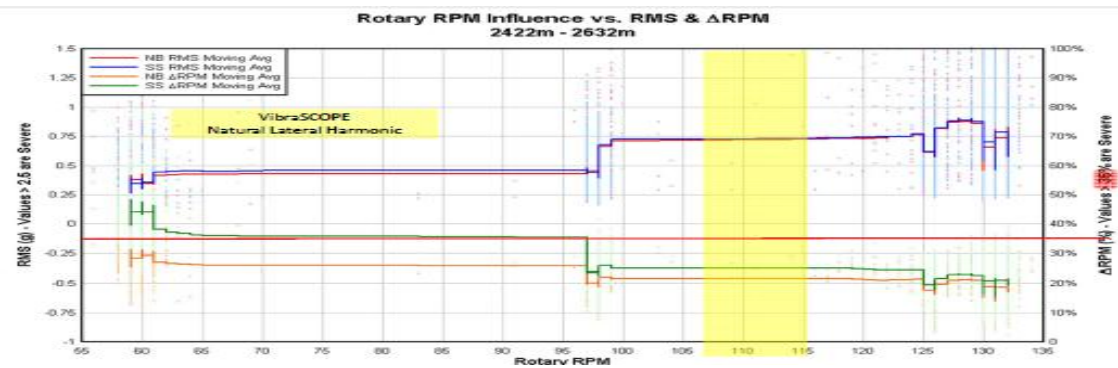


Figura 63. Se muestran las vibraciones laterales y torsionales, en base al número de RPM donde se originaron movimientos armónicos naturales laterales generados en la sarta de perforación.

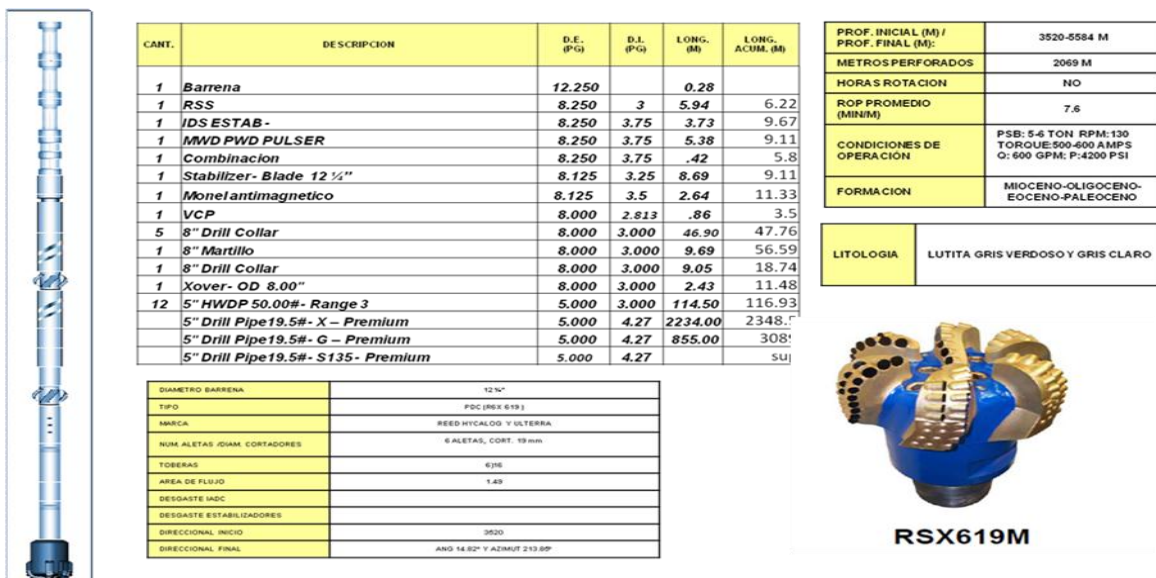


Figura 64. Se describe los componentes de la sarta de perforación donde se muestra el RSS y el PWD, este último contiene integrado el sensor de vibración.

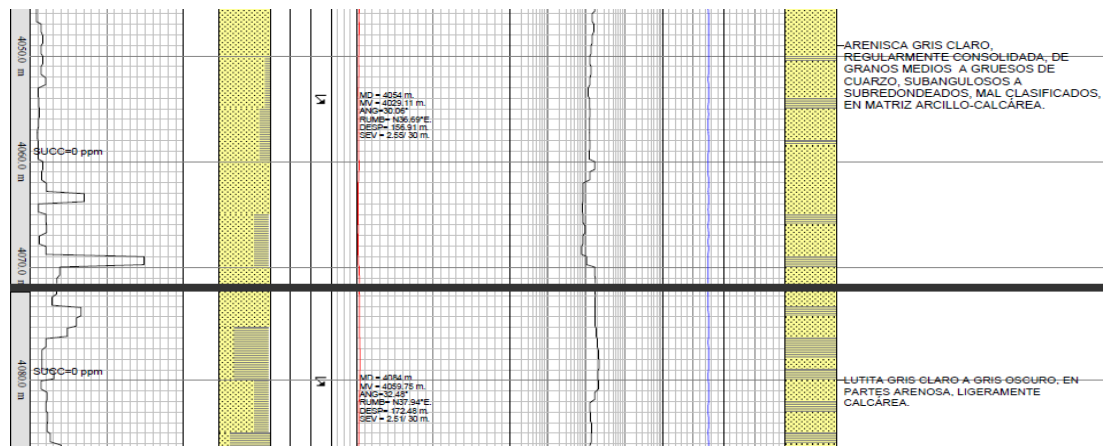


Figura 65. Master Log. Pozo Exploratorio Bricol 2DL, sección de 12 ¼”.

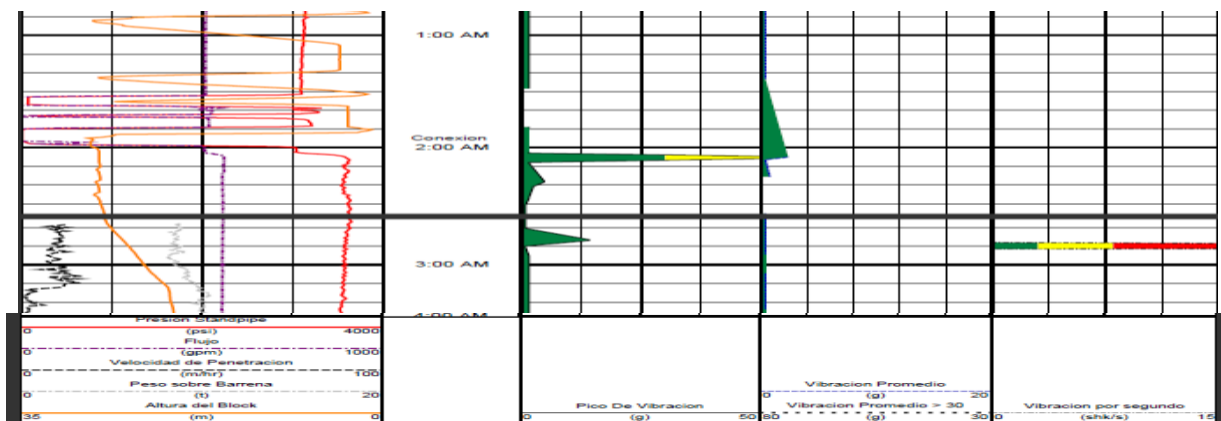
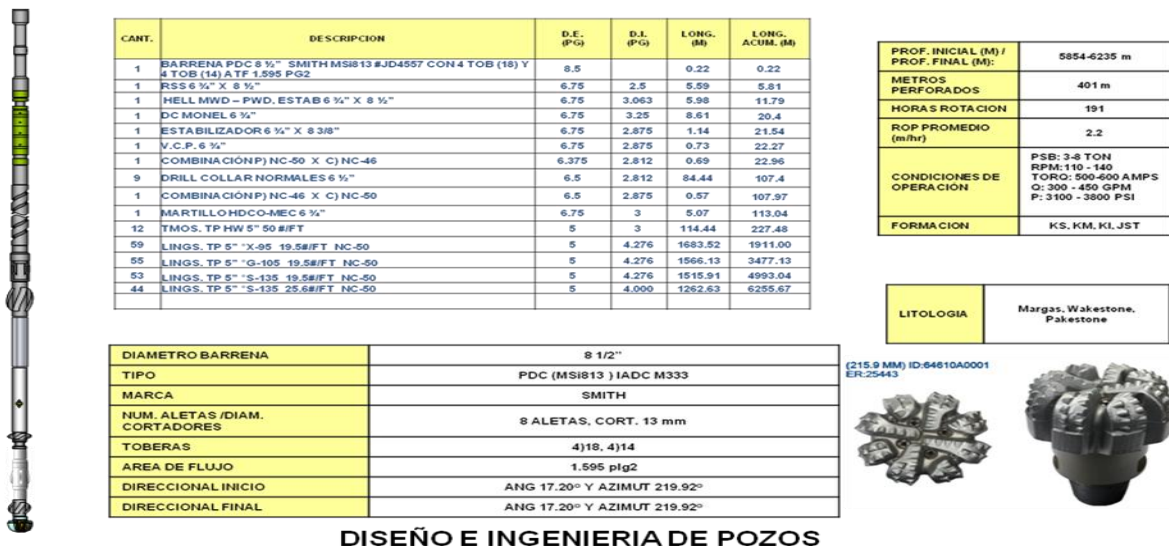


Figura 66. Se muestran los picos de vibración generado detectados por el sensor de vibración dentro de la sarta de perforación, el cual se observa vibraciones medias como máxima vibración.

En la etapa de 8 ½”, se perforó con la aplicación de la Ingeniería de Fatiga donde se desarrolló con éxito durante toda la sección al no tener presencia de pescados. Se perforó con barrena pdc convencional en una primera corrida y con el uso de la sarta rotatoria RSS para mantener ángulo y rumbo y el uso del PWD con la integración del sensor de vibración para seguir monitoreando las vibraciones ya que en esta sección se encuentra la formación más dura llamada pedernal en la formación que tiene por nombre Cretácico Superior Agua Nueva (KSAN) hasta el asentamiento del liner de 7” en la cima de formación Jurásico Superior Kimmeridiagno a la profundidad de 6235 m, donde se perforó litología de 100 % dolomía. Cabe mencionar que durante el KSAN, se detectó vibraciones altas continuas como las torsionales, laterales y axiales, donde en la segunda corrida se detuvo la perforación por quedar fuera de servicio el sistema rotatorio debido a las altas vibraciones provocadas por formación perforada, donde también se cambió

la barrena por una de diseño especial en una tercera corrida llegando hasta la profundidad programada. En la figura 66 se muestra el sensor de vibración donde se detectaron las mas alta vibraciones, donde al observar esto se cambiaron los parámetros de perforación para mejor el avance del ROP pero sobretodo para tratar de mitigar las vibraciones. El KSAN apareció a la profundidad de 5700 metros y solo tuvo un espesor de 60 metros, pero lo importante fue que en un solo viaje se atravesó todo el pedernal, cuando se tenía previsto 3 viajes.



DISEÑO E INGENIERIA DE POZOS

Figura 67. Se describen los componentes de la sarta de perforación en la sección de 8 1/2" con un sistema rotatorio y barrena pdc de 8 1/2" y el PWD donde viene integrado el sensor de vibración.

TIEMPO PROGRAMADO	TIEMPO REAL	AHORRO
29 DIAS	19 DIAS	10 DIAS

COSTO PROGRAMADO	COSTO REAL	AHORRO
\$ 24, 594, 772.29	\$ 21, 236, 466.84	\$ 8,358,305.45

Figura 68. En esta tabla comparativa se describe el ahorro en tiempo y costo en la sección de 8 1/2".

En la sección de 5 7/8 la cual se perforó con barrena pdc convencional y sarta empacada sin equipo direccional, esto debido a las altas temperaturas que presenta el Pozo Bricol 2DL 164° C, ya que los sistemas de medición y sensores de vibración no soportan las altas temperaturas, ni dinámicas, ni mucho menos la temperatura estática. Por tal motivo no se tiene registrado las vibraciones generadas en esta etapa, sin embargo se aplico la ingeniería de fatiga en la sarta de perforación a todo lo que fue el BHA, dando como resultado una perforación

exitosa sin pescados. Sin embargo en esta sección no se dejó de aplicar la Ingeniería de Fatiga en la sarta de perforación lo cual al término de la perforación no presentó pescados.

Profundidad original programada 6642 md (6215 mv), se perforaron 158 m adicionales a la etapa de 5 7/8", (6800 m) tuvo un ahorro de 10 días.

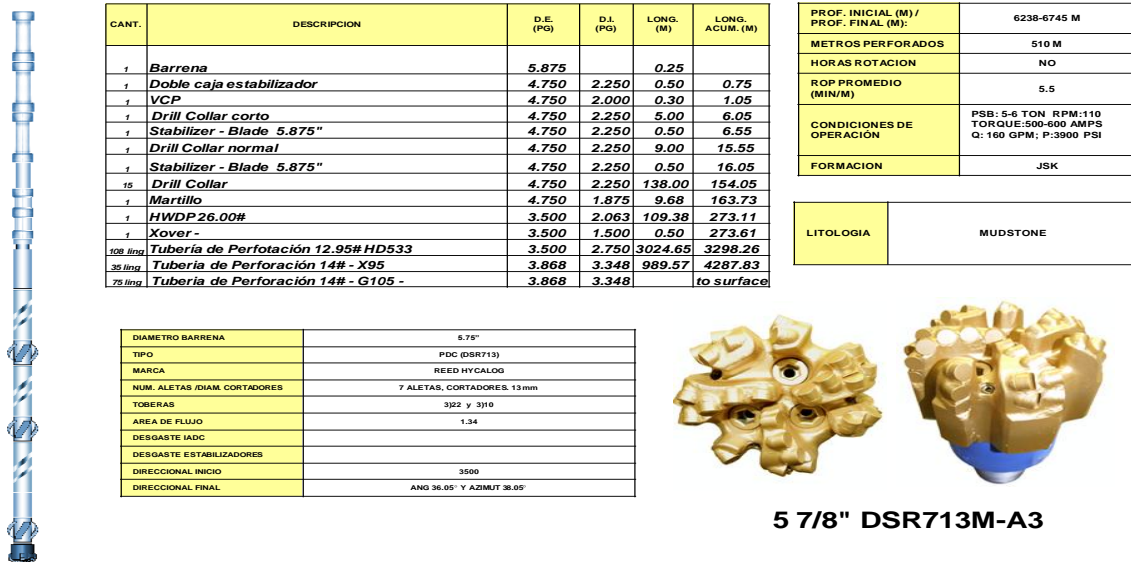


Figura 69. Se describen los componentes de la sarta de perforación en la sección de 5 7/8" con una sarta empacada estabilizada aplicando la Ingeniería de Fatiga.

TIEMPO PROGRAMADO	TIEMPO REAL	AHORRO
29 DIAS	19 DIAS	10 DIAS

COSTO PROGRAMADO	COSTO REAL	AHORRO
\$ 24, 594, 772.29	\$ 21, 236, 466.84	3,358,305.45

Figura 70. En esta tabla comparativa se describe el ahorro en tiempo y costo en la sección de 5 7/8".

4.6 Nuevo modelo de Sarta de Perforación aplicando la Ingeniería de Fatiga.

Las vibraciones mecánicas presentes en las sargas de perforación tienen gran influencia en el rendimiento de la perforación de pozos petroleros. Éstas se clasifican como ya lo hemos visto anteriormente en tres tipos según su dirección: axial, torsional y lateral o transversal; ésta última es la responsable en la mayoría de los casos, de las fallas en las herramientas y componentes del ensamblaje de fondo. Dentro de una metodología integrada de control de vibraciones, el modelaje y simulación de las sargas de perforación constituye una actividad fundamental en la fase de análisis y planificación de los programas de perforación de los pozos.

Por lo que se ha detectado la importancia de la misma, para lograr el incremento del rendimiento en el proceso de perforación. En este estudio, se presentan los fundamentos teóricos y la metodología de modelaje mediante el método de elementos finitos, para obtener como producto un programa computacional que permite simular las condiciones dinámicas de la sarga de perforación cuando se encuentra en operación. De esta manera se podrán conocer las frecuencias y los modos de vibración transversales a las cuales está sometido el Ensamblaje de Fondo (BHA) de la Sarga de Perforación, para así evitar el efecto de resonancia y hacer más efectivo el proceso si la formación es dura, se generan frecuencias debido al impacto de los dientes o insertos de la barrena.

En el caso de una barrena tricónica se pueden esperar por ejemplo, frecuencias de 3xRPM. Otras fuentes potenciales de excitación la constituyen las bombas de lodo y los estabilizadores. Un estabilizador con 4 aletas rectas por ejemplo, puede generar una señal con frecuencias de 4xRPM.

4.6.1 Vibraciones transversales de la sarga.

Las frecuencias resonantes transversales dependen principalmente de las dimensiones y rigidez de los elementos de la sarga, de la ubicación y holgura de los estabilizadores, del peso aplicado sobre la mecha y de la inclinación del hoyo. Este último parámetro es de suma importancia, ya que es uno de los factores que determina el punto en el cual la tubería por encima del último estabilizador hace contacto con las paredes del hoyo, estableciendo efectivamente la longitud del sistema vibratorio transversal. Por este motivo, la vibración transversal no se puede apreciar en la superficie, a menos que se acople con los modos axiales y torsionales.

4.6.2 Descripción general del modelo.

Para obtener la información requerida sobre el comportamiento del sistema, se utiliza el Método de Elementos Finitos (MEF), de amplia aceptación para la solución numérica de problemas de ingeniería, particularmente en el área de

elasticidad tanto estática como dinámica. El comportamiento de la sarta de perforación se analiza en un plano longitudinal que contiene al sistema (Figura 71), fijándose las condiciones de contorno en el tope, fondo y puntos de contacto entre la sarta-hoyo, y se divide en tres problemas desacoplados entre sí: vibraciones transversales, axiales y torsionales. El objetivo del presente análisis numérico del sistema es determinar los modos y frecuencias de vibración transversales.

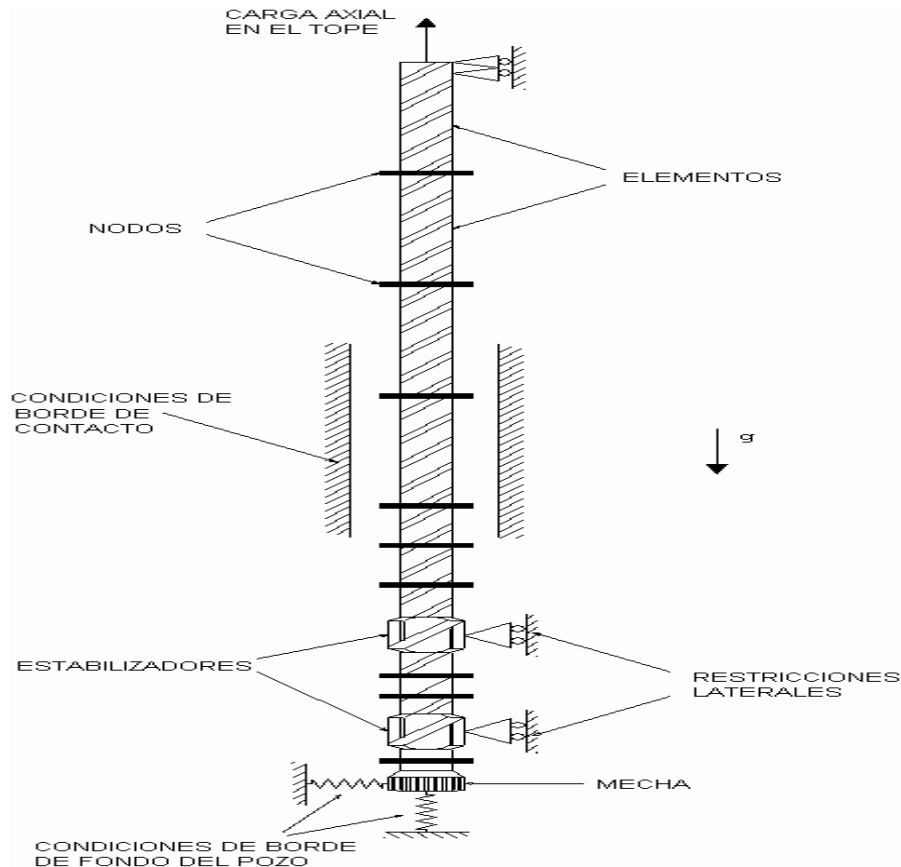


Figura 71. Configuración de la sarta de perforación donde se muestran los problemas de vibración.

4.6.3 Análisis dinámico transversal.

De los tres tipos de análisis, el caso más complejo es el de vibraciones transversales. Esto es debido a que las condiciones de contorno no están predeterminadas antes de obtener la solución, dado que los puntos de contacto de la sarta con el hoyo, debido a las fuerzas estáticas aplicadas, determinarán las condiciones de contorno, pero estos puntos a su vez no se conocen hasta que se realiza un análisis no lineal geométrico estático en el rango elástico lineal del modelo. Por lo tanto, antes de efectuar el análisis dinámico transversal, es necesario efectuar un análisis estático para determinar la forma deformada de la sarta, con lo que se obtienen los puntos de contacto entre sarta y agujero que se usarán como condiciones de contorno en el análisis dinámico transversal.

4.6.4 Análisis estático.

En el análisis estático se busca obtener la forma deformada de la sarta debido a las cargas aplicadas, tales como el peso propio de la misma, las fuerzas de flotación debidas a lodo de perforación, y el peso sobre la mecha especificado, tomando en cuenta las restricciones de desplazamiento a lo largo del sistema, debidas a los miembros (barrena, estabilizadores, mesa rotatoria), y al confinamiento de la sarta en el agujero. Dado que no se conocen a priori los puntos de contacto entre la sarta y el agujero, que dependen de la configuración deformada de la sarta, que a su vez depende de los puntos de contacto, el problema es de naturaleza no lineal y tiene que ser resuelto iterativamente.

En el análisis estático de un sistema elástico usando el MEF, se busca reducir el problema continuo a uno discreto, mediante la ecuación algebraica matricial de la forma: $K \cdot Q = F$ (1) en donde K es la matriz de rigidez del sistema, Q es el vector de grados de libertad (GDL), formado por los desplazamientos de los nodos de los elementos, y F es el vector de cargas nodales equivalentes del sistema. La matriz K y el vector F se obtienen de superponer o “ensamblar”, las matrices de rigidez de los elementos.

Como se mencionó anteriormente, la sarta de perforación se modelará como una estructura plana con elementos conectados rígidamente. Durante el análisis estático se utilizan elementos tipo marco, de 3 grados de libertad por nodo (Figura 72).

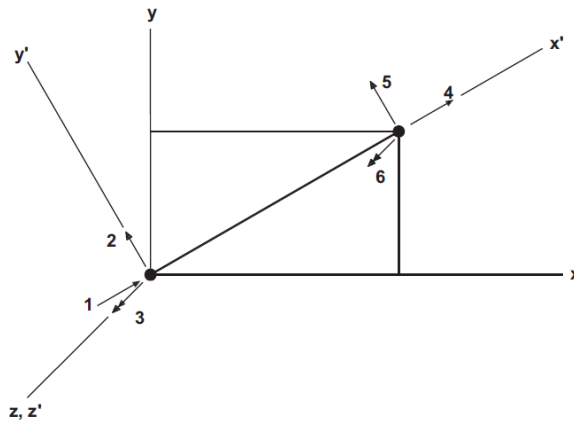


Figura 72. Estructura plana con elementos conectados rígidamente.

4.6.5 Análisis dinámico.

Una vez determinada la forma deformada de la sarta a través del análisis estático, se puede efectuar el análisis dinámico para obtener los modos y frecuencias de vibración del sistema en la dirección transversal a la sarta. En este caso, el sistema dinámico de la sarta se modela como una viga unidimensional, utilizando el método de elementos finitos. Esto implica nuevamente convertir el problema continuo en un problema discreto, mediante la siguiente ecuación algebraica matricial:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F$$

en donde M es la matriz de masa del sistema, C es la matriz de amortiguamiento, K es la matriz de rigidez y F es el vector de cargas nodales equivalentes del sistema. El elemento tipo viga usado en esta etapa del problema se muestra en la Figura 73.

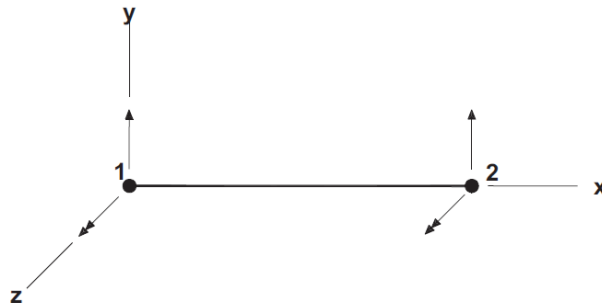


Figura 73. Elemento tipo viga.

Tomado del artículo. Computer model to predict drillstring lateral vibration modes and frequencies using the finite-element-method and modal analysis David Bukowitz¹, Joaquín Morán¹ y Rafael Bravo² ¹Escuela de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Apartado 4011-A-526, Maracaibo, Venezuela. Tel: +58-261-7598772. dbukowitz@luz.edu.ve. ²Mechanical Engineering Department, McMaster University. Hamilton, ON, Canada

4.7 Diseño de Sarta de perforación con el nuevo modelo de Aplicación de la Ingeniería de Fatiga.

Al diseñar una sarta de perforación, el diseñador raramente decide los atributos de un componente en particular. En vez de eso, él, o ella, forma una “sarta” al enroscar juntos hasta varios cientos de aditamentos fuera del suelo. En esta actividad, el diseñador intentará seleccionar los componentes que equilibren un número de necesidades conflictivas con frecuencia, incluyendo cargas, hidráulicos, limpieza del agujero, velocidad de penetración, direccionamiento, medición y tal vez el más crítico, sanidad estructural de la misma sarta de perforación. Al mantener la sanidad estructural, el diseñador enfrenta dos desafíos de diseño individuales. Primero, prevenir la falla por sobrecarga, y segundo

prevenir la falla por fatiga. El mercado para los componentes de sarta de perforación es principalmente un mercado de rentas, en el cual un solo componente será usado y reutilizado un número de veces por un número de diseñadores. Adicionalmente, éste es un mercado para el cual los componentes son especificados y comprados principalmente para resistencia bajo cargas estáticas relativamente altos. La resistencia a la falla por sobrecarga, no por resistencia a la fatiga, es el enfoque principal de las normas y especificaciones que cubren los componentes de la tubería de perforación. Por causa de estos factores, el diseñador seguido es dejado en la oscuridad en situaciones que son muy importantes por afectar un diseño de fatiga que se puede trabajar. Esto se ilustra mejor al revisar el mecanismo de fatiga y en los enfoques disponibles para el diseñador para controlarlo.

A este nuevo modelo de sarta de perforación teórico aplicando la Ingeniería de Fatiga, se han propuesto herramientas esenciales para desarrollar la perforación cuidando todos los aspectos de Fatiga y así tener un buen rendimiento, para conseguir reducir los tiempos y costos que esto contrae, no se descarta cualquier incidente dentro de la perforación, pero se asegura hasta un 90% de desempeño de trabajo adecuado con este nuevo modelo de sarta de perforación.

4.7.1 Black box.

Se propone diseñarlo con la herramientas que se muestra en la figura 74, llamada black box, la cual registra todos los parámetros presentados en el BHA durante toda la perforación, la cual es bastante útil para predecir la perforación de los próximos pozos reduciendo así en un 98% los problemas de vibración y curvatura de la sarta. El Black box, registra las vibraciones, así como la pérdida de energía, detectando con ello la vida de fatiga del BHA, también detecta el ritmo de penetración y las vibraciones laterales. El Black box detecta las vibraciones torsionales, el deslizamiento de la sarta y puede enviar recomendaciones de que ROP es el adecuado para perforar. Es utilizado en cualquier tipo de sarta direccional.

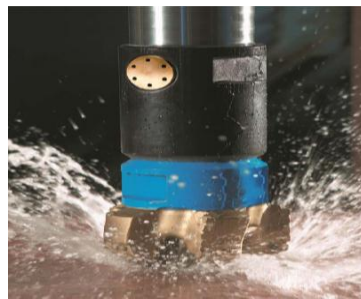


Figura 74. Imagen de herramienta Black Box.

4.7.2 Estabilizador con Rodillo.

Los estabilizadores con rodillos ofrecen un punto de estabilización con un torque bajo en el que los cortadores con forma de rodillo "ruedan" sobre la pared del pozo. Esto reduce el torque y el movimiento en falso del vástago y la vibración resultante. La reducción de la vibración puede alargar la vida útil del "tiempo medio entre fallos" (MTBF) de otros componentes del aparejo de fondo de pozo. Además, comparado con un estabilizador de cuchilla fija, el escariador de rodillos causa menos daños en la pared del pozo.

El pozo escariado mediante la eliminación de las secciones estrechas y de las protuberancias reducirá de forma significativa el número de viajes de ida y vuelta al fondo. Los cortadores de escariado bidireccionales y reversos han sido diseñados para facilitar el escariado en sentido contrario en puntos estrechos al sacar la sarta de perforación del pozo. Esto sólo se puede hacer allí- donde las torres petroleras están provistas de equipos top drive. La mejora del perfil del pozo reduce la frecuencia de los incidentes en los que la sarta se atasca y por consiguiente de las operaciones de pesca.

El torque puede ser un factor negativo en la recolección de testigos prueba o corazones de buena calidad. La reducción del movimiento en falso del vástago, que permite que la rotación del barril sea más constante y reduce la vibración, contribuirá favorablemente al análisis de los corazones o testigos de prueba.



Figura 75. Imagen del estabilizador con rodillos.

4.7.3 Amortiguador.

Con características de construcción sencilla opera fácil y seguro. Esta herramienta amortigua la vibración lateral y puede superar el impacto y la carga de vibrar desde el resorte durante la operación de perforación. Usando el amortiguador de vibración, puede aumentar la vida útil de la barrena y el BHA, además de acelerar

la perforación y eliminar el saltado de perforación y proteger los equipos superficiales.



Figura 76. Imagen del amortiguador.

4.7.4 Software dinámico para el diseño de sarta (vibrascope).

El vibrascope fue empleado para hacer análisis previo a los pozos, y dar mejor resultado al aplicar la Ingeniería de Fatiga, referente al BHA, y la sarta de perforación. Este software utiliza análisis de elementos finitos (FEA), para modelar los movimientos dinámicos de la sarta de perforación e identificar combinaciones en condiciones de operación y parámetros de perforación que resultan ser fuerza axial, lateral y vibración torsional mientras se perfora. Este software entrega una recomendación de parámetros de perforación basados en una aproximación científica que minimiza el riesgo de vibración en la sarta de perforación.

4.7.5 Sensores de vibración.

Los sensores de vibración son añadidos como estándar a todas las nuevas y reformadas herramientas de medición en tiempo real. Con ello se asegura que al aplicar la Ingeniería de Fatiga asegura el éxito de la perforación. Ellas consisten de 2 acelerómetros de estado sólido, ortogonalmente montado en la x (lateral) y z (axial), ejes del MWD o PWD en la tarjeta electrónica. La tarjeta electrónica monitorea los niveles de impacto medidos por los acelerómetros sobre periodos consecutivos de 16 segundos y categorizar el nivel de corriente como ser bajo, (seguro) moderado (advertencia) o alto (los daños que resultan) para ambos ejes y lecturas laterales. Normalmente la herramienta solo transmitirá lecturas a la superficie si las últimas 2 condiciones están presentes por medio de un solo pulso al final de cada transmisión dinámica. El dato es presentado gráficamente al ingeniero de pozo en la pantalla del piso de perforación, permitiéndole monitorear la condición y apropiar cambios para los parámetros de la perforación.

Estableciendo seguridad, golpe y vibración de libre perforación ayuda a optimizar la tasa de perforación y prevenir daños a la sarta de perforación y herramientas de perforación.

4.7.6 Agitator Tool.

El Agitator ha proporcionado la tecnología sin paralelo de reducción de fricción en el fondo del pozo por más tiempo que cualquier otra herramienta del mercado. El Agitator oscila suavemente la Sarta de Perforación (BHA) para reducir la fricción y mejorar de forma significativa la transferencia de peso. Al mejorar la transferencia de peso se reduce el stick-slip al perforar y principalmente durante la perforación direccional al orientar una sarta navegable con motor.

El Agitator proporciona una excitación a la Sarta de Perforación para mejorar la transferencia de peso a la barrena. Extiende los límites de la perforación en pozos de largo desplazamiento con sargas navegables y mejora la eficiencia en aplicaciones menos complejas o con ensambles rotatorios.



Figura 77. Imagen de Agitator.

Características y beneficios.

Mejora Significativamente el Control Direccional.

- La oscilación suave del BHA reduce la fricción y mejora significativamente la transferencia de peso.

Compatibilidad con Herramientas de Fondo.

- Compatible con todos los MWD/LWD del mercado.
- Probado en campo por encima de RSS.
- Reduce el Stick-slip y mejora el control direccional.
- Extiende la capacidad de continuidad.
- Evita el colgamiento y permite mejorar el control direccional.
- Proporciona un medio de deslizamiento con mejor ROP y menor aplicación de peso.
- Permite la transferencia de peso con menor compresión de la tubería de perforación.
- Reduce los impactos durante la perforación.
- Reduce la vibración lateral y torsional.

- Optimiza la eficiencia de los sistemas navegables rotatorios.
- No interfiere con la señal de otras herramientas de fondo.
- Se coloca por encima o debajo del MWD.
- No ejerce fuerza de impacto sobre la barrena ó tubulares.

Eficiencia.

- Incrementa el ROP al deslizar.
- Reduce la pérdida de tiempo al orientar y trabajar el BHA.
- Permite incrementar el ROP en algunas aplicaciones con rotaria.

Compatibilidad con Barrenas.

- Puede ser utilizado con barrenas tricónicas ó PDC.
- No daña los cortadores ó rodamientos por impacto.
- Extiende la vida de la barrena mediante una transferencia de peso constante; evita el reinicio la perforación

Fuente de información. ©2010 National Oilwell Varco. All rights reserved.
Except as noted, all trademarks referenced in this document, are trademarks of NOV. Rev. 01

4.7.7 Tubería de aluminio de Perforacion.

Torque y arrastre.

La fuerza de fricción entre las tuberías y los pozos/caja de pared es el factor más importante en determinar el torque y la conducta del arrastre de los tubulares. Esta fuerza es causada por la fuerza normal ejercida por los tubulares de peso impulsados y el factor de fricción entre las superficies en contacto.

Los recursos más comunes de torque son:

1. El torque pequeño.
2. El torque a lo largo del pozo.
3. El torque mecánico (corte, estabilizadores, centralizadores).

Mientras, el arrastre se acumula principalmente durante recogiendo, aflojando y deslizando la perforación. La inclinación de la perforación y la curvatura llevaran la fuerza del arrastre a los niveles mas altos debido a la gravedad y a las fuerzas compresivas que empujan las cadenas contra el lado bajo de la perforación y debido a las fuerzas de tensión que empujan las cadenas al lado alto.

El torque puede incrementar significativamente como un resultado de un incremento de carga compresiva debido a fuerzas de contacto entre la tubería y la pared del pozo. Además, el comportamiento de pandeo es importante cuando se

analiza los requerimientos de torque. Por mucho tiempo la sección del ángulo horizontal alto algunas veces el deslizamiento de la perforación (motor solo aplicaciones) es requerido por periodos extendidos de tiempo. Los arrastres excesivos pueden limitar el peso transferido para mejorar la cadena de perforación de pandeo y reducir el control direccional. Los niveles altos de torque pueden exceder la capacidad de la unidad superior, tablas giratorias o la cadena de perforación. Los niveles altos de arrastre pueden ir más allá de la elevación de la capacidad de la plataforma o de los límites de tensión de los tubulares. La capacidad de la plataforma y la actualización de las cadenas de perforación puede ser necesaria a fin de alcanzar las metas.

Doblado.

El punto de arranque (PA) de las curvas de radio pequeño/mediano y la severidad de “pata de perro” (SPP) son comunes en los pozos. En lugar como la tubería podrían ser rotados bajo tensión alta o esfuerzos de compresión. El doblado inicial ocurre en las secciones curvadas pero la carga de compresión axial empuja además del doblado entre las tuberías vástago. Bajo tales condiciones los tubulares pueden experimentar fallas en la forma del rendimiento y la fatiga a pesar de la alta carga de doblado.

Típicamente, el máximo esfuerzo de flexión esta experimentado la mitad de la tubería de perforación TP. Aunque una vez que el cuerpo de la tubería contacta al pozo, la localización del máximo esfuerzo de flexión tiende moverse desde la mitad del cuerpo de la tubería como la carga compresiva se incrementa. Esto explica porque la tubería no puede doblar más debido al apoyo de la acción de la pared del pozo resultando en una desviación de la parte sin contacto en la tubería de perforación TP.

Fatiga.

La fatiga es una forma de falla experimentada por un material en la tensión de carga cíclica mucho más baja que su tensión/fluencia. La conducta de la fatiga es usualmente descrita por el trazado de la tensión de amplitud (S) contra el número de ciclos (N) para fallar en lo que se llama curva S-N. La ejecución del material es caracterizado por el limite de resistencia en N ciclos.

En el caso de las operaciones de perforación el esfuerzo de flexión cíclica es experimentado por la tubería de perforación cuando se dobla como si rotara. Si la magnitud de estas tensiones es bastante alta hace hincapié en la fatiga que produce en todas las revoluciones y que acumula a través de la vida de servicio del tubo. La falla de fatiga es usualmente un resultado de rotación del tubo en una “pata de perro” alta.

Pandeo.

Como el ángulo incrementa en el pozo hace la tendencia para la tubería que se acueste en la parte inferior del pozo. Esto permite a la tubería alcanzar un estado de estabilidad y para llevar el esfuerzo de compresión axial más alta sin pandeo. Aunque cuando más energía se pone en el sistema de pandeo para que pueda ocurrir. Dependiendo de la magnitud de la carga compresiva y la rigidez del tubo sinusoidal o pandeo helicoidal que pueda desarrollar. Otro incremento en la carga compresiva que lo llevara a cerrar donde las fuerzas laterales son extremadamente altas y sin peso que pueda ser transferido de un punto a otro.

Tubería de aluminio de perforación.

TAP es un tubo transparente con calefacción atornillada de acero, tubería vástago o tuberías vástago de aluminio integral. La clave requiere para el diseño de la tubería de aluminio de perforación son especificadas en ISO-15546 "tubería de aleación de aluminio de perforación para la industria de petróleo y gas". Las normas establecen para la tubería de aluminio de perforación deberían ser entregados de la misma forma como la tubería de acero de perforación en la plataforma, así que tiene sentido usar tubería de acero vástago. También la extensión de la vida de servicio para las conexiones del Instituto Americano del Petróleo (IAP) es mejor que su contraparte de aluminio. Sin embargo el servicio de vida de los hilos de acero con cuerpo de aluminio como los sencillos de las tuberías de aluminio pesan significativamente menos que su equivalente en acero la cual a su vez reduce el uso de la conexión en todos los componentes.

Sujeta a medir un propósito, los fabricantes pueden proveer los siguientes tipos de tuberías de aluminio de perforación.

- Con extremos de malestar internos y externos.
- Con protección incrementada del espesor para la protección contra el desgaste del cuerpo de tubería tan bien como la sarta de perforación de pandeo.
- Las pesadas paredes que se utilizan como los tubos no magnéticos.
- La plataforma externa de espiral para mejorar el corte de transporte de la sección de perforaciones horizontales.

Torque y arrastre.

Algunas diferencias en términos de torque y arrastre fueron detectados. Había una reducción del 36% en torque y 50% de arrastre por usar la tubería de aluminio de perforación. Para usar un material más ligero la fuerza normal ejercida por los tubos en las paredes del pozo fue reducido. Esto a su vez ayudo a bajar las fuerzas de torque y arrastre. Esto debería ser valido dependiendo de la inclinación

del pozo y en pozos verticales el incremento y decremento del peso del tubo no tuviera ninguna influencia en la fuerza normal.

Las reducciones en peso, torque y arrastre por el uso de la tubería de aluminio de perforación podrían permitir la utilización del equipo de perforación con una baja tasa para alcanzar la meta

Dinámicas de perforación.

La herramienta sensor provee resultados para la perforación y el escariado. Ambos escenarios entregan resultados que fueron también considerados para el propósito de este estudio. Mientras la perforación las más grandes influencias en los resultados fueron la interacción y la configuración del Ensemble del Fondo de Perforación. Mientras el escariado, los factores que determinaron la conducta dinámica fueron las características de la tubería de perforación y las prácticas de operación. Las vibraciones laterales, tangenciales y axiales durante la perforación y el escariado se mantienen a los niveles más bajos tanto para las cadenas y los puntos de medición.

Aún cuando el modelo de la tubería de aluminio de perforación desarrollo comparativamente causa más pandeo que el correspondiente a la tubería de acero de perforación, esto es únicamente una desviación sinusoidal sin alcance en la región helicoidal. Esta condición permite perforar para continuar en modo giratorio.

Adicionalmente la posibilidad de incluir tubería de acero de perforación y tubería de aluminio de perforación en la misma sarta de perforación fue también explorada.

Los niveles similares de la carcasa de desgaste, pandeo y torque se encuentran en ambos modelos. El único modelo de tubería de aluminio de perforación presentó ventajas de factor de seguridad de fatiga y la posibilidad de continuar con la perforación de deslizamiento, por otro lado, la tubería de aluminio y acero de perforación es más ventajosa debido a la reducción de peso en el aire, arrastre, torque, estiramiento y pérdida de presión. Sin embargo la elección del modelo más óptimo debería estar hecha de acuerdo al factor que necesita ser mejorado para una aplicación dada.

Discusión y perspectiva.

Ventajas considerables de la tubería de aluminio de perforación sobre la tubería de acero de perforación fueron. Los niveles reducidos de torque, Arrastre, carcasa de desgaste, fatiga, poder de consumo y la posibilidad de poder usar la calificación más baja de perforaciones fueron solo algunas de estos beneficios.

El único modelo de la tubería de aluminio de perforación mostró una tendencia más grande hacia el pandeo, aunque únicamente alcanzó un estado sinusoidal, permitiendo la perforación para continuar. El pandeo extremo podría causar contacto con el cuerpo de la tubería con el pozo o la cubierta de pared y su abrasión susceptible llegara a rápida erosión. Consecuentemente, la tubería de aluminio de perforación no debería ser ejecutada en secciones donde las altas cargas compresivas son esperadas pero no bajo tensión para maximizar sus beneficios. En casos donde esto no es factible, una solución podría ser el uso de almohadillas de desgaste o tuberías con el aumento del grosor de la pared.

Conclusiones.

Este documento centra su atención en uno de los aspectos que debería ser mejorado para completar los objetivos de perforación de alcance extendido (PAE): la optimización de la sarta de perforación. Esto demostró que por usar tuberías de aluminio de perforación en lugar de tuberías de acero de perforación, varios beneficios podrían ser obtenidos.

Algunos de los inconvenientes de la tubería de aluminio de perforación comparada con la tubería de acero de perforación, incluyeron:

- Tendencia de pandeo más alta.
- Susceptibilidad de corrosión con valor de PH en exceso de 11.0 por periodos prolongados.
- El precio más alto (50 a 150% más alto).
- El rendimiento más bajo/resistencia a la tracción.

Aunque este estudio demostró que las ventajas de la tubería de aluminio de perforación superan con creces las desventajas. Fue encontrado que los siguientes beneficios pueden ser alcanzados:

- Las cargas equivalentes del equipo de perforación se pueden reducir. Esto significa una oportunidad para alcanzar las metas extendidas de los mismos lugares y sin plataformas costosas mejoradas (unidad superior y bombeo).
- La reducción de peso de la cadena de perforación y mayor resistencia-relación peso.
- Reducción en la cadena de perforación, torque y arrastre.
- Tubos con mejorada vida de fatiga.
- Máxima permitida "pata de perro".
- Disminución de carcasa de desgaste.
- Eje de la sarta de perforación y esfuerzos de flexión son menos debido al más grande factor de flotabilidad y las más pequeñas fuerzas de arrastre
- El tramo bajo su propia cadena de perforación el peso es similar o más pequeño que la tubería de acero de perforación.

- Mayor flexibilidad que permite la disminución de construir ángulos por el seguimiento de lado.

Fuente de información. IADC/SPE 128910 Can Aluminum Drillpipe Extend the operating Envelope for ERD Projects? Mark Jenkins, Alejandro Castro Rodriguez, Christian Linke, George Mader, All Baker Hughes y Mark J. Davies, Alcoa Oil and Gas.

4.7.8 Esquema del Nuevo Modelo de Sarta de Perforación.

Finalmente se presenta el nuevo modelo de sarta de perforación teórico con las herramientas ya mencionadas que pueden proveer una mayor eficiencia en la perforación al estar aplicando Ingeniería de fatiga y con esto reducir muchos problemas en tiempo y costo que contraen al no aplicar un modelo de sarta de perforación adecuado a las condiciones de trabajo existentes. **Cabe mencionar que es fundamental e importante, hacer una adecuada inspección técnica a los tubulares a través del QA/QC antes de realizar cualquier diseño de sarta para así alcanzar los objetivos ya mencionados.**



4.7.9 Calidad de control de aseguramiento (QA/QC).

Para aplicar el QA/QC se observó en base a las necesidades de Pemex y el procedimiento es el siguiente:

1.- Auditoría de instalaciones y equipos de perforación para obtener una referencia de calidad en general incluyendo:

- .- Compañías de inspección.
- .- Vendedores de equipos.
- .-Talleres de maquinaria.
- .- Manejo de los equipos de perforación.
- .- Mantenimiento apropiado de equipos.

2.- Rotación de tiempo completo durante seis meses, estando presentes en:

- .- Desmontaje.
- .- Inspección.
- .- Ensamblaje.
- .- Pruebas de funcionamiento.
- .- Reparación de herramientas.

Se planea inicialmente utilizar las auditorias para obtener una referencia de los servicios prestados por los vendedores de equipos, compañías de inspección, talleres de maquinaria, y equipos de perforación. Después de la auditoría, se requiere un compromiso de Pemex para comenzar a mejorar la calidad de los equipos que son enviados a la los equipos de perforación. Esto será ejecutado mediante la presencia de los especialistas mientras se trabaja en los equipos de sondeo. Durante este periodo se les informará a Pemex los descubrimientos y se le darán las actualizaciones regularmente. Se tiene que evaluar el progreso para una justificación futura de continuidad o discontinuidad de QA/QC.

Alcance de proyecto-Auditorías.

Los siguientes son aspectos generales que son documentos durante le proceso de auditoría:

- 1.- Documentación de los procesos y las prácticas de control de calidad.
- 2.- Actividades y procesos de planeación para actividades asociadas.
- 3.- Procesos no conformes/acciones correctivas/mejoramiento de calidad.
- 4.- Gestión de calibración de equipos.
- 5.- Certificaciones y entrenamiento.

CAPÍTULO 5.- ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO.

En esta análisis económico se muestra el costo total de la perforación del Pozo Exploratorio Bricol 2DL, donde por ser exploratorio en comparación de un pozo de desarrollo el costo se incrementa hasta un 40%. Se describen las diferentes etapas de perforación con los distintos diámetros que engloba desde la superficie hasta la profundidad programada donde se observa los costos directos e indirectos. El costo total programado es de \$ 384, 339,992.05 pesos.

Este análisis de costo económico es calculado a través del software oficial de Pemex MICOP que permite al diseñador evaluar de mejor forma y costear con exactitud el costo total del pozo para cualquier tipo de intervención, ya que en este software vienen incluidas todas las partidas con precios en moneda nacional y extranjera de todas las compañías subcontratadas.



PEMEX EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN SUBDIRECCIÓN DE PERFORACIÓN Y MANTENIMIENTO DE POZOS COSTO INTEGRAL DETALLADO POR ETAPA E INSUMOS

IMPORTES EN PESOS MEXICANOS

U.O Responsable : 211 - U. O. COI

Pozo: BRICOL 2 DL

Genera Usuario: <<Roberto Juar

4 Datos Generales

Etapa	MOVIMIENTO	CONDUCTORA		SUPERFICIAL		INTERMEDIA	
Barrena:	0	36		26		17 1/2	
TR:	0	30		20		13 3/8	
Prof. Cima:	0.0			50.0		1,000.0	
Prof. Base:	0.0	50.0		1,000.0		3,050.0	
Fecha Inicio:	23/06/2010 12:00 PM	08/07/2010 12:00 PM		11/07/2010 12:00 PM		27/07/2010 12:00 PM	
Fecha Término:	08/07/2010 12:00 PM	11/07/2010 12:00 PM		27/07/2010 12:00 PM		14/09/2010 09:36 PM	
INSUMOS DE LA INTERVENCIÓN	MOVIMIENTO	CONDUCTORA		SUPERFICIAL		INTERMEDIA	
		CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA
CAMPANA Y LINEA DE FLOTE	7,388.60	492.57	985.15	4,433.16	3,448.02	19,407.40	4,925.74
SERVICIO DE PERFORACION ALIANZA	0.00	594,450.23	1,188,900.47	14,040,028.86	10,920,022.45	40,391,567.54	10,251,666.89
Total Insumos por Fase :	7,388.60	594,942.80	1,189,885.62	14,044,462.02	10,923,470.47	40,410,974.94	10,256,592.63

Etapa	INTERMEDIA	INTERMEDIA	EXPLOTACIÓN	TOTALES			
Barrena:	12 1/4	8 1/2	6 1/2				
TR:	9 5/8	7	5				
Prof. Cima:	3,050.0	5,750.0	6,290.0				
Prof. Base:	5,750.0	6,290.0	6,800.0				
Fecha Inicio:	14/09/2010 09:36 PM	26/11/2010 04:48 PM	17/01/2011 09:36 PM				
Fecha Término:	26/11/2010 04:48 PM	17/01/2011 09:36 PM	23/02/2011 07:12 PM				
INSUMOS DE LA INTERVENCIÓN	INTERMEDIA		INTERMEDIA		EXPLOTACIÓN		TOTALES
	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	
CAMPANA Y LINEA DE FLOTE	28,470.75	7,388.60	20,786.61	4,925.74	10,787.36	7,388.60	120,828.30
SERVICIO DE PERFORACION ALIANZA	57,562,068.89	14,938,253.18	16,283,017.03	3,858,534.84	13,708,905.81	9,389,667.52	193,127,077.71
Total Insumos por Fase :	57,590,539.64	14,945,641.78	16,303,803.64	3,863,460.58	13,719,693.17	9,397,050.12	193,247,906.01

Equipo: 206 Tarifa Día Mov. Equipo: 184,978.32 Tarifa Día Operación Equipo: 413,423.28 Tarifa Día Mantto Equipo:							
CUOTAS Y TARIFAS APLICADAS A LA INTERVENCIÓN	MOVIMIENTO	CONDUCTORA		SUPERFICIAL		INTERMEDIA	
		CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA
TARIFA DE MANTENIMIENTO DE EQUIPO	0.00	49,715.00	99,430.00	447,434.99	348,004.99	1,958,770.97	497,149.99
TARIFA DE MOVIMIENTO DE EQUIPO	2,774,674.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TARIFA DE OPERACION DE EQUIPO	0.00	413,423.28	826,846.56	3,720,809.52	2,893,962.96	16,288,877.23	4,134,232.80
Total Cuotas Y Tarifas por Fase :	2,774,674.80	463,138.28	926,276.56	4,168,244.51	3,241,967.95	18,247,648.20	4,631,382.79
TOTALES DE LA INTERVENCIÓN							
COSTOS DIRECTOS POR FASE	\$2,782,063.40	\$1,058,081.08	\$2,116,162.18	\$18,212,706.53	\$14,165,438.42	\$58,658,623.14	\$14,887,975.42
COSTOS INDIRECTOS POR FASE	\$1,661,659.20	\$110,777.28	\$221,554.56	\$996,995.52	\$775,440.96	\$4,364,624.83	\$1,107,772.80
SUBTOTAL DE FASE	\$4,443,722.60	\$1,168,858.36	\$2,337,716.74	\$19,209,702.05	\$14,940,879.38	\$63,023,247.97	\$15,995,748.22
FACTOR DE RIESGO (18%)	\$500,771.41	\$190,454.59	\$380,909.19	\$3,278,287.18	\$2,549,778.92	\$10,558,552.17	\$2,679,835.58
TOTAL DE FASE :	\$4,944,494.01	\$1,359,312.95	\$2,718,625.93	\$22,487,989.23	\$17,490,658.30	\$73,581,800.14	\$18,675,583.80
COSTO INTEGRAL DE LA INTERVENCIÓN:	\$384,339,992.05						

CUOTAS Y TARIFAS APLICADAS A LA INTERVENCIÓN	INTERMEDIA		INTERMEDIA		EXPLOTACIÓN		TOTALES
	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	
TARIFA DE MANTENIMIENTO DE EQUIPO	2,873,526.95	745,724.99	2,097,972.97	497,149.99	1,088,758.48	745,724.99	11,449,364.31
TARIFA DE MOVIMIENTO DE EQUIPO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2,774,674.80
TARIFA DE OPERACION DE EQUIPO	23,895,865.58	6,201,349.20	17,446,462.42	4,134,232.80	9,053,969.83	6,201,349.20	95,211,381.38
Total Cuotas Y Tarifas por Fase :	26,769,392.53	6,947,074.19	19,544,435.39	4,631,382.79	10,142,728.31	6,947,074.19	109,435,420.49

TOTALES DE LA INTERVENCIÓN							
COSTOS DIRECTOS POR FASE	\$84,359,932.17	\$21,892,715.97	\$35,848,239.03	\$8,494,843.37	\$23,862,421.48	\$16,344,124.31	\$302,683,326.50
COSTOS INDIRECTOS POR FASE	\$6,402,926.78	\$1,661,659.20	\$4,674,801.22	\$1,107,772.80	\$2,426,022.43	\$1,661,659.20	\$27,173,666.78
SUBTOTAL DE FASE	\$90,762,858.95	\$23,554,375.17	\$40,523,040.25	\$9,602,616.17	\$26,288,443.91	\$18,005,783.51	\$329,856,993.28
FACTOR DE RIESGO (18%)	\$15,184,787.79	\$3,940,688.87	\$6,452,683.03	\$1,529,071.81	\$4,295,235.87	\$2,941,942.38	\$54,482,998.77
TOTAL DE FASE :	\$105,947,646.74	\$27,495,064.04	\$46,975,723.28	\$11,131,687.98	\$30,583,679.78	\$20,947,725.89	\$384,339,992.05

Tabla 1. En esta tabla comparativa se describe los costos calculados para cada etapa de la perforación.

En la siguiente tabla de este análisis económico los cálculos se efectuaron con las operaciones realizadas en caso de una pesca tal y como sucedió en el Pozo Exploratorio Chaya 1 A, donde los costos económicos son muy elevados ya que representa en el 2% del costo total de la perforación. Para este caso el costo total directo de insumos por fase es de \$ 12, 258,801.05 pesos y el costo total de la intervención de \$ 34, 043,326 pesos.



PEMEX EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN
SUBDIRECCIÓN DE PERFORACIÓN Y MANTENIMIENTO DE POZOS
COSTO INTEGRAL DETALLADO POR ETAPA E INSUMOS

IMPORTES EN PESOS MEXICANOS

U.O Responsable : 211 - U. O. CO

Pozo: **BRICOL 2DL**

Genera Usuario: << Roberto Jia

INSUMOS DE LA INTERVENCIÓN	INTERMEDIA		TOTALES
	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	
BARRENA	996,387.08	0.00	996,387.08
CUCHARA DESVIADORA	3,317,730.59	0.00	3,317,730.59
EQUIPO DE CONTROL DE SOLDOS	207,405.96	116,006.72	323,412.68
ESTABILIZADOR	166,231.71	0.00	166,231.71
MOLINO	46,523.81	0.00	46,523.81
MWD	39,036.55	0.00	39,036.55
PESCANTES	113,764.01	0.00	113,764.01
SERVICIO DE CEMENTACION	0.00	1,407,886.87	1,407,886.87
SERVICIO DE FLUIDO	3,989,758.76	0.00	3,989,758.76
SERVICIO DE PERFORACION DIRECCIONAL	198,701.73	0.00	198,701.73
SERVICIO DE PESCA	261,600.30	0.00	261,600.30
TOP DRIVE (SISTEMAS IMPULSORES)	864,107.01	483,314.09	1,347,421.10
TRAILER HABITACION	32,287.02	18,058.84	50,345.86
Total Insumos por Fase :	10,233,534.53	2,025,266.52	12,258,801.05

Equipo: 524 Tarifa Día Mov. Equipo: 0.00

Tarifa Día Operación Equipo: 397,432.32

Tarifa Día Manto Equipo:

CUOTAS Y TARIFAS APLICADAS A LA INTERVENCIÓN	INTERMEDIA		TOTALES
	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	
TARIFA DE MANTENIMIENTO DE EQUIPO	977,728.32	546,864.99	1,524,593.31
TARIFA DE MOVIMIENTO DE EQUIPO	0.00	0.00	0.00
TARIFA DE OPERACION DE EQUIPO	7,816,168.96	4,371,755.52	12,187,924.48
Total Cuotas Y Tarifas por Fase :	8,793,897.28	4,918,620.51	13,712,517.79

49,715

TOTALES DE LA INTERVENCIÓN			
COSTOS DIRECTOS POR FASE	\$19,027,431.81	\$6,943,887.03	\$25,971,318.84
COSTOS INDIRECTOS POR FASE	\$2,178,619.84	\$1,218,550.08	\$3,397,169.92
SUBTOTAL DE FASE	\$21,206,051.65	\$8,162,437.11	\$29,368,488.76
FACTOR DE RIESGO (18%)	\$3,424,937.73	\$1,249,899.67	\$4,674,837.39
TOTAL DE FASE :	\$24,630,989.38	\$9,412,336.78	\$34,043,326.15
COSTO INTEGRAL DE LA INTERVENCIÓN:	\$34,043,326.15		

Tabla 2. Se describe los costos por operación de una pesca mostrando los costos directos e indirectos, esta pesca representa el 2% del costo total de la perforación de un proyecto,

Ingeniería de Fatiga

Este análisis económico se calculó con todo lo referente a la aplicación de la Ingeniería de Fatiga donde solo evalúa las herramientas direccionales integradas a la sarta de perforación para minimizar las vibraciones, donde el costo total es de \$ 35, 221, 122. 54 pesos equivalentes al 4% del costo total de la perforación del pozo.



PEMEX EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN SUBDIRECCIÓN DE PERFORACIÓN Y MANTENIMIENTO DE POZOS COSTO INTEGRAL DETALLADO POR ETAPA E INSUMOS

IMPORTES EN PESOS MEXICANOS

U.O Responsable : 211 - U. O. COI

Pozo: BRICOL 2 DL

Genera Usuario: << Roberto Juar

Etapa	MOVIMIENTO	CONDUCTORA		SUPERFICIAL		INTERMEDIA	
		CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA
Barrena:	0	36		26		18 1/2	
TR:	0	30		20		16	
Prof. Cima:	0.0			50.0		1,000.0	
Prof. Base:	0.0	50.0		1,000.0		2,500.0	
Fecha Inicio:	23/06/2010 12:00 PM	08/07/2010 12:00 PM		08/07/2010 08:00 PM		24/07/2010 12:00 PM	
Fecha Término:	08/07/2010 12:00 PM	08/07/2010 08:00 PM		24/07/2010 12:00 PM		23/08/2010 12:00 PM	
INSUMOS DE LA INTERVENCIÓN	MOVIMIENTO	CONDUCTORA		SUPERFICIAL		INTERMEDIA	
		CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA
BARRENA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MWD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PWD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SARTA ROTATORIA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SERVICIO DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total Insumos por Fase :	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Pozo: BRICOL 2 DL

Roberto Juarez López >>

Etapa	INTERMEDIA		INTERMEDIA		INTERMEDIA	
	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA
Barrena:	17 1/2		14 3/4		12 1/4	
TR:	13 3/8		11 3/4		9 5/8	
Prof. Cima:	2,500.0		3,500.0		4,820.0	
Prof. Base:	3,500.0		4,820.0		5,580.0	
Fecha Inicio:	23/08/2010 12:00 PM		28/09/2010 12:00 PM		26/10/2010 12:00 PM	
Fecha Término:	28/09/2010 12:00 PM		25/10/2010 12:00 PM		10/12/2010 12:00 PM	
INSUMOS DE LA INTERVENCIÓN	INTERMEDIA		INTERMEDIA		INTERMEDIA	
	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA
BARRENA	0.00	0.00	0.00	0.00	1,143,618.58	0.00
MWD	1,960,370.00	0.00	0.00	0.00	2,156,820.12	0.00
PWD	2,162,206.80	0.00	0.00	0.00	5,621,737.68	0.00
SARTA ROTATORIA	535,893.98	0.00	0.00	0.00	1,071,787.95	0.00
SERVICIO DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL	6,855,635.80	0.00	0.00	0.00	3,225,250.68	0.00
Total Insumos por Fase :	11,514,106.58	0.00	0.00	0.00	13,219,215.01	0.00

Pozo: BRICOL 2 DL

Etapa	EXPLOTACIÓN		EXPLOTACIÓN		
	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	
Barrena:	8 1/2		5 7/8		
TR:	7		5		
Prof. Cima:	5,580.0		6,897.0		
Prof. Base:	6,897.0		7,267.0		
Fecha Inicio:	10/12/2010 12:00 PM		15/02/2011 12:00 PM		
Fecha Término:	15/02/2011 12:00 PM		06/04/2011 12:00 PM		
INSUMOS DE LA INTERVENCIÓN	EXPLOTACIÓN		EXPLOTACIÓN		TOTALES
	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	
BARRENA	0.00	0.00	0.00	0.00	1,143,618.58
MWD	1,078,410.06	0.00	0.00	0.00	5,195,600.18
PWD	2,810,868.84	0.00	0.00	0.00	10,594,813.32
SARTA ROTATORIA	1,009,502.11	0.00	0.00	0.00	2,617,184.04
SERVICIO DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL	5,589,019.94	0.00	0.00	0.00	15,869,906.42
Total Insumos por Fase :	10,487,800.95	0.00	0.00	0.00	35,221,122.54

Ingeniería de Fatiga

Pozo: BRICOL 2 DL		Genera Usuario: << Roberto Juárez López >>						
		Equipo: 331	Tarifa Día Mov. Equipo: 174,714.24	Tarifa Día Operación Equipo: 403,159.20		Tarifa Día Mantto Equipo:		
CUOTAS Y TARIFAS APLICADAS A LA INTERVENCIÓN	MOVIMIENTO	CONDUCTORA		SUPERFICIAL		INTERMEDIA		
		CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	
TARIFA DE MANTENIMIENTO DE EQUIPO	0.00	0.00	16,571.67	331,433.33	447,434.99	845,154.99	646,294.99	
TARIFA DE MOVIMIENTO DE EQUIPO	2,620,713.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
TARIFA DE OPERACION DE EQUIPO	0.00	0.00	134,386.40	2,687,728.00	3,628,432.80	6,853,706.40	5,241,069.60	
Total Cuotas Y Tarifas por Fase :	2,620,713.60	0.00	150,958.07	3,019,161.33	4,075,867.79	7,698,861.39	5,887,364.59	
TOTALES DE LA INTERVENCIÓN								
COSTOS DIRECTOS POR FASE	\$2,620,713.60	\$0.00	\$150,958.07	\$3,019,161.33	\$4,075,867.79	\$7,698,861.39	\$5,887,364.59	
COSTOS INDIRECTOS POR FASE	\$1,661,659.20	\$0.00	\$36,925.76	\$738,515.20	\$996,995.52	\$1,883,213.76	\$1,440,104.64	
SUBTOTAL DE FASE	\$4,282,372.80	\$0.00	\$187,883.83	\$3,757,676.53	\$5,072,863.31	\$9,582,075.15	\$7,327,469.23	
FACTOR DE RIESGO (18%)	\$471,728.45	\$0.00	\$27,172.45	\$543,449.04	\$733,656.20	\$1,385,795.05	\$1,059,725.63	
TOTAL DE FASE :	\$4,754,101.25	\$0.00	\$215,056.28	\$4,301,125.57	\$5,806,519.51	\$10,967,870.20	\$8,387,194.86	
COSTO INTEGRAL DE LA INTERVENCIÓN:	\$221,800,948.99							

Pozo: BRICOL 2 DL		Roberto Juárez López >>					
CUOTAS Y TARIFAS APLICADAS A LA INTERVENCIÓN	INTERMEDIA		INTERMEDIA		INTERMEDIA		
	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	
TARIFA DE MANTENIMIENTO DE EQUIPO	1,193,159.98	596,579.99	1,093,729.98	298,290.00	1,242,874.98	994,299.98	
TARIFA DE MOVIMIENTO DE EQUIPO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
TARIFA DE OPERACION DE EQUIPO	9,675,820.80	4,837,910.40	8,869,502.40	2,418,955.20	10,078,980.00	8,063,184.00	
Total Cuotas Y Tarifas por Fase :	10,868,980.78	5,434,490.39	9,963,232.38	2,717,245.20	11,321,854.98	9,057,483.98	
TOTALES DE LA INTERVENCIÓN							
COSTOS DIRECTOS POR FASE	\$22,383,087.36	\$5,434,490.39	\$9,963,232.38	\$2,717,245.20	\$24,541,069.99	\$9,057,483.98	
COSTOS INDIRECTOS POR FASE	\$2,658,654.72	\$1,329,327.36	\$2,437,100.16	\$664,663.68	\$2,769,432.00	\$2,215,545.60	
SUBTOTAL DE FASE	\$25,041,742.08	\$6,763,817.75	\$12,400,332.54	\$3,381,908.88	\$27,310,501.99	\$11,273,029.58	
FACTOR DE RIESGO (18%)	\$4,028,955.72	\$978,208.27	\$1,793,381.83	\$489,104.14	\$4,417,392.60	\$1,630,347.12	
TOTAL DE FASE :	\$29,070,697.80	\$7,742,026.02	\$14,193,714.37	\$3,871,013.02	\$31,727,894.59	\$12,903,376.70	
COSTO INTEGRAL DE LA INTERVENCIÓN:							

Pozo: BRICOL 2 DL						TOTALES
CUOTAS Y TARIFAS APLICADAS A LA INTERVENCIÓN	EXPLOTACIÓN		EXPLOTACIÓN			
	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA	CONSTRUCCION DEL	CAMBIO DE ETAPA		
TARIFA DE MANTENIMIENTO DE EQUIPO	2,634,894.96	696,009.99	1,988,599.97	497,149.99	13,522,479.79	
TARIFA DE MOVIMIENTO DE EQUIPO	0.00	0.00	0.00	0.00	2,620,713.60	
TARIFA DE OPERACION DE EQUIPO	21,367,437.80	5,644,228.80	16,126,368.00	4,031,592.00	109,659,302.40	
Total Cuotas Y Tarifas por Fase :	24,002,332.56	6,340,238.79	18,114,967.97	4,528,741.99	125,802,495.79	
TOTALES DE LA INTERVENCIÓN						
COSTOS DIRECTOS POR FASE	\$34,490,133.51	\$6,340,238.79	\$18,114,967.97	\$4,528,741.99	\$161,023,618.33	
COSTOS INDIRECTOS POR FASE	\$5,871,195.84	\$1,550,881.92	\$4,431,091.20	\$1,107,772.80	\$31,793,079.36	
SUBTOTAL DE FASE	\$40,361,329.35	\$7,891,120.71	\$22,546,059.17	\$5,636,514.79	\$192,816,697.69	
FACTOR DE RIESGO (18%)	\$6,208,224.03	\$1,141,242.98	\$3,260,694.23	\$815,173.56	\$28,984,251.30	
TOTAL DE FASE :	\$46,569,553.38	\$9,032,363.69	\$25,806,753.40	\$6,451,688.35	\$221,800,948.99	
COSTO INTEGRAL DE LA INTERVENCIÓN:						

Tabla 3. Se describe los costos al aplicar las herramientas que constituyen la Ingeniería de Fatiga el cual representa el 4% del costo total del proyecto,

5.1 Propuesta financiera para supervisar las herramientas.

Se propone seguir aplicando la Ingeniería de Fatiga a través de un programa de supervisión en todos los pozos de perforación de la Unidad Operativa Comalcalco, el cual consiste en supervisar e inspeccionar de manera constante todas las herramientas introducidas al pozo para evitar que durante el trabajo de las mismas se desgasten y provoquen con esto un pescado, llevando a una pérdida de días y dinero. A continuación se describe el financiamiento de esta propuesta para utilizar la Ingeniería de Fatiga en la inspección de las herramientas introducidas al pozo

FINANCIAMIENTO.

El tiempo requerido para este análisis operacional varía notablemente de caso a caso dependiendo de la cantidad de información que se requiera revisar y los escenarios probables. La tarifa por servicios de Ingeniería de Fatiga es aproximada a \$270 por hora.

Descripción	Costo unidad	Tarifa	Total
Investigación y pruebas metalúrgicas	\$270.00	11	\$2,970.00
Valoración de roscas	\$800.00	1	\$800.00
SEM (de ser necesario)	\$500.00	1	\$500.00
Elaboración del reporte	\$270.00	7	\$1,890.00
Costo total estimado			\$6,160.00

Descripción	Horas	Tarifa	Total
Revisión de la información de información suministrada con el fin de determinar potenciales causas de la falla. El análisis considerará aumentara la integridad estructural mediante criterios de diseño y podría incluir trabajo computacional para probar hipótesis que surjan como posibles soluciones. Las horas estimadas se basan en una investigación profunda de un pozo problemático.	26	\$270.00	\$7,020.00
Recopilación de los resultados del análisis, conclusiones y recomendaciones en un reporte final de ingeniería.	8	\$270.00	\$2,160.00
Costo total estimado			\$9,180.00

El presupuesto estimado se basa en tarifas no concretas pero que incluye tres días de viaje y entrega de la rotación entre técnicos para mantener una rotación continua. El técnico de aseguramiento de calidad (QA) presenciara 28 días de inspecciones como tercera parte y documentará las actividades en varias instalaciones de equipos de perforación y supervisará. Este análisis ha sido dividido en costos mensuales estimados para una rotación permanente de dos técnicos que apoyaran a las instalaciones de Pemex continuamente por seis meses.

Descripción	Costo unidad	Tarifa	Total
Técnico de QA	\$1,325.00	1	\$41,075.00
Transporte aéreo	\$1,000.00	NA	\$1,000.00
Hospedaje	\$120.00	1	\$3,600.00
Viáticos	\$70.00	1	\$2,170.00
Transporte local	\$80.00	1	\$2,480.00
Otros gastos	\$100.00	NA	\$1,000.00
Contingencia	N/A	NA	\$5132.50
Total			\$56,457.50

Todos los presupuestos y alcances mencionados del proyecto mencionados tienen el propósito de ser utilizados como una guía para determinar la cantidad de trabajo esperado y estimar los costos. La cantidad precisa de trabajo y sus costos asociados podrían ser más altos o más bajos que los mencionados.

Entrenamiento costo.

El costo total del curso es de \$36,000 para un máximo de doce personas. Cada persona adicional tendrá un valor adicional de \$ 2000. El valor del curso incluye un día de preparación del salón y tres días de entrenamiento.

Entrenamiento en prevención de fallas de Tp.

El objetivo del instructor será preparar a los trabajadores de los equipos de perforación en los pasos que se pueden tomar para hacer la prevención de fallas en los sondeos. Este curso puede ser dictado junto al curso de entrenamiento. El costo adicional del curso es de \$14, 000.

Entrenamiento en equipo de perforación.

El objetivo del instructor será preparar a los trabajadores de los equipos de perforación en los pasos que se pueden tomar para minimizar las fallas en los sondeos. Los temas que serán tratados incluyen prácticas adecuadas de manipulación de equipos, inspecciones, grupos de fallas, tipos de conexiones y entrenamiento práctico en el equipo de perforación o en los estantes de almacenamiento de tubería (de ser posible).

Este curso tiene un valor de \$18, 000 para un máximo de doce personas por cada sesión más gastos. El costo adicional por cada persona es de \$1000. La duración esperada de éste entrenamiento es de tres días.

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Debido a que la fatiga causa tan alta proporción de fallas de sartas de perforación, existe la necesidad drástica para mejorar los métodos de diseño de fatiga.

El Índice de Curvatura combinado con otras técnicas de mitigación de fatiga puede mejorar significativamente la habilidad para diseñar una sarta de perforación resistente a la fatiga.

Las fallas por fatiga repetitivas a la misma profundidad indican un problema de trayectoria.

El cálculo de vida de fatiga total no es práctico para un componente de sarta de perforación debido a la complejidad del mecanismo de fatiga y el número de incógnitas que enfrenta el diseñador de la sarta de perforación.

Dos índices sin dimensión, Índice de Curvatura e Índice de Estabilidad, han sido desarrollados para permitir a los diseñadores de sartas de perforación comparar cuantitativamente las alternativas de diseño sobre la base de vida de propagación de grieta de fatiga normalizada, para el propósito de seleccionar el que posee el mejor desempeño de fatiga.

Los dos índices de diseño no rendirán valores significativos de vida de fatiga absoluta, pero sí proporcionarán una comparación cuantitativa de las vidas de fatiga relativa de los componentes que operan bajo los diferentes conjuntos de circunstancias, incógnitas de factores iguales.

Las curvas que el diseñador puede usar para estas comparaciones están disponibles en el Diseño y Operación de la Sarta de Perforación.

Es evidente que aplicando la Ingeniería de Fatiga en la Administración de la perforación de un pozo petrolero se reducen los tiempos y costos de la perforación total del pozo, llevando consigo que la administración sea la esencia para poder desarrollar cualquier proyecto.

Se discretizó el sistema para cada 2.5 pies de longitud de la sarta, ya que estudios de sensibilidad realizados indican que este espaciado es necesario para obtener una información de autovalores confiables; para valores mucho menores los resultados se mantienen sin mucho cambio, pero el tiempo de computación se incrementa considerablemente; mientras que para longitudes mucho mayores se mejora el tiempo de cómputos pero se sacrifica la confiabilidad de los resultados.

Del análisis estático se obtuvo el primer punto de contacto tubería-hoyo por encima del último estabilizador a 104 pies desde la barrena lo cual concuerda con datos experimentales y otros estudios realizados a este BHA, los cuales utilizaron métodos y discretizaciones similares a los aplicados.

Se muestran los dos primeros modos de vibración del ensamblaje de fondo. Se comparan las frecuencias de resonancia obtenidas mediante el programa desarrollado, pruebas experimentales. Se puede apreciar que tanto para el primer y segundo modo los valores obtenidos concuerdan con los de las referencias.

Se efectuaron tres pruebas mas con el BHA, con diferentes longitudes de la sarta y usando la misma discretización anterior, obteniéndose excelentes resultados. Además se realizaron pruebas con el modelo de Sarta utilizado donde se obtuvieron modos de vibración laterales y frecuencias similares

Se desarrolló un programa computacional basado en el método de elementos finitos, que permite determinar las frecuencias y los modos de vibración transversales de la sarta de perforación el cual fue validado mediante la comparación con otros estudios de simulación y pruebas experimentales.

El programa determina efectivamente los puntos de contacto entre la sarta y el hoyo, de tal manera se puede determinar la longitud de la sarta que está libre de vibrar transversalmente. Se obtuvieron excelentes resultados usando longitudes de los elementos menores a 2.5 pies. En función de la rapidez de ejecución, el programa puede ser utilizado en campo para precisar los rangos de operación segura o los cambios a realizar en la configuración del BHA, para minimizar los riesgos de fallas durante el proceso de perforación. La rapidez del programa depende de la longitud de la sarta y de la longitud de los elementos seleccionada. En el caso de la prueba realizada con el BHA-01, la simulación duró aproximadamente 6 segundos en un computador con procesador de 1.6 GHz

La tubería de aluminio de perforación no es “una medida para todos”. En casos específicos sus beneficios pueden ser superados por las desventajas. La clave para desbloquear las ventajas potenciales es utilizar tuberías de aluminio de perforación que se encuentran en un detallado caso por caso, fase de planeación. Las propiedades mecánicas de la tubería de aluminio de perforación lo hacen la elección ideal para:

- La perforación de alcance extendido (PAE) y los pozos ultra profundos.
- La perforación de las embarcaciones flotantes (la flexibilidad del aluminio. puede compensar los movimientos de los buques).
- Cuando el eje de las fuerzas de arrastre excedió la capacidad de la plataforma o el acero regular.

- Cuando los requerimientos de torque excedió la capacidad de la unidad superior de la plataforma.
- La perforación en ambientes ácidos (H_2S o CO_2).

Hasta el momento la utilización de la tubería de aluminio de perforación ha sido restringida a unos cuantos proyectos en todo el mundo. El buen desempeño y la disponibilidad de la tubería de acero de perforación en proyectos convencionales han hecho la mejor opción. Aunque el incremento con tendencia a la perforación de alcance extendido (PAE) y la perforación profunda de riesgo deberían abrir una gran ventana de oportunidad para la tubería de aluminio de perforación.

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIÓN.

Comunicación efectiva entre la Unidad Operativa, el VCD y CCPTR.

La Perforación en la etapa de ampliación con herramienta excéntrica de 14 ½" x 17 ½" en formación 100 % arenisca, se efectuó un récord único a nivel mundial, donde se tuvo un ahorro de 21 días en tiempo y costo por equipo. Técnica la cual se utilizó posterior en distintos pozos.

La ampliación de 10 5/8" x 12 ¼", perforó con herramienta concéntrica, operación la cual se hizo por primera vez en la región sur.

Profundidad original programada 6642 md (6215 mv), se perforaron 158 m adicionales a la etapa de 5 7/8" , (6800 m) tuvo un ahorro de 10 días. Se terminó el pozo en 255 días de 259 días programados. (108 días de perforación de 200 programados).

Se alcanzó el éxito del desarrollo de la Perforación Global del pozo Exploratorio Bricol 2DL, realizando **TRE**, tomando en cuenta que se consideró al todo el personal que laboró en el pozo como **LSC (Líder sin cargo)**, **PUMM (Primeros, únicos, más y mejores)** y **MDM (Mejor del Mundo)**.

La perforación exitosa del Pozo Exploratorio Bricol 2DL, fue resultado del conjunto de ideas experimentadas con el uso de ideas nuevas, para realizar trabajos realmente excepcionales en participación con las compañías que laboraban en el pozo, donde cada uno de los que estaban presentes se destacó por un gran valor de ética profesional entregando día a día lo mejor de sí mismos en beneficio del pozo, pero que sobre todo el verdadero éxito radica en la comunicación efectiva transmitiendo la confianza.

Se enfrentaron retos tecnológicos para enfrentar condiciones de perforación lo bastante complejas como pérdida de fluido, pozo arrancado, pegadura diferencial, atrapamiento, gasificación, donde se perforó ampliando de 10 5/8" a 12 1/4" con ampliador concéntrico mecánico manteniendo tangente de 36° de inclinación, ya que uno de los retos desde el punto de vista direccional es lidiar con todo lo imprevisto y fue terminada 4 días antes de lo programado.



Fotografía 1. Personal que laboró y participó en la perforación exitosa del Pozo Exploratorio Bricol 2DL.

GLOSARIO

ACR: Análisis Causa Raíz.

Af: zona final de la sección transversal.

AIF: Aplicación de la Ingeniería de Fatiga.

Ampliadora excéntrica: Herramienta que se utiliza para ampliar un agujero ya perforado con diámetro existente a un agujero de mayor diámetro.

ASCII(American Standard Code for Information Interchange): es un [código de caracteres](#) basado en el [alfabeto latino](#).

Asientos de llave: Severidad causada con un cierto ángulo de inclinación.

Asíntota: es una recta a la cual otra función se le va aproximando indefinidamente.

Atrapamiento: Cuando la sarta de perforación queda estática sin movimientos hacia arriba y hacia abajo.

Azimut: Cuadrantes.

Barrena: Herramienta con la que se perfora la formación.

BHA: (Bottom Hole Assembly): ensamblaje de fondo.

BSC: Índice de esfuerzo de curvatura.

BSR: Índice de esfuerzo de rigidez.

CCPTR: Centro de monitoreo en tiempo real.

Ciclo de histéresis: definida por la deformación total y rango de tensión total representada el trabajo mas elástico de plástico en un material sometido a carga y descarga.

CO₂:bioxido de carbono.

Core: Núcleo.

Craqueo: es un [proceso químico](#) por el cual se quiebran [moléculas](#) de un [compuesto](#) produciendo así compuestos más simples

Curvatura crítica(Cc): Curva a punto de causar ruptura.

DC(Drill collars): Herramienta usada para dar peso a la sarta de perforación.

ESR : Ampliador excéntrico.

Estabilizadores: Mantiene la estabilidad del agujero.

GPN: Producto Nacional Bruto.

Gyro: Herramienta de Medición (ángulo, rumbo y profundidad).

H₂S: Gas sulfídrico.

HCF: región de la fatiga de alto ciclo.

Hookload: Carga al gancho.

HWDP: Tubería de perforación extrapesada.

ID: Diámetro interior

Inc: Inclinación.

KSAN: Jurásico Superior Agua Nueva.

Lastrabarrena. Drill Collar.

LCF: Región de la fatiga de bajo ciclo.

LF: Longitud final.

LSC : Líder sin cargo.

MSE: Energía Mecánica Específica.

MWD: Measure While Drilling.

OD: Diámetro exterior.

Pata de perro: Severidad generada por un alto ángulo.

PEP: Pemex Exploración y Producción.

PEZ: Herramienta dejada en el fondo del pozo.

POA: Movimientos de equipo anual.

POT: Movimiento de equipo trimestral.

Pump rate: Velocidad de bombeo.

PWD: Pressure While Drilling.

QA/QC: Calidad de control, calidad de aseguramiento.

RAE: Reunión de análisis estratégico.

RMP: Revolución por minuto.

ROP: Ritmo de penetración.

RSS: sistema rotatorio.

Shock severity: Presión severidad de descarga.

SI: índice de estabilidad

SSPA: Seguridad, Salud y Protección Ambiental.

SWT: Modelo Smith-watson-topper.

Torque: Punto de ruptura en la cuerda, cuando se presenta alta fricción.

TP: Tubería de perforación

TRE: Trabajo realmente excepcional.

VCDSE: Visualización, Conceptualización, Definición, Seguimiento y Evaluación.

WOB: Peso Sobre Barrena.

BIBLIOGRAFÍA.

TH HILL DS 1 second edition, TH HILL associates. Inc. March 1998.

TH HILL Seshadri P.V Durham Approach to drillstem Failure Prevention SPE 220002, 1991.

Clar J, Reynolds, N, Ellis, Advances in Fatigue Designs: Curvature Index Theory and Case Study World Oil (october 2003).

Ellis Reynolds. Use NC56 connections in 8 1/2" drill collars and cut 1 1/2" or 3/4" 1/2" Pin tress Relief Grooves on Rotated Bha connections NC38 and larger SPE 87191 (2004).

An innovative Design Approach to reduce Drill String Fatigue; (March 2004) SPE International.

P.C. Kriesels, W.J.G. Keultjes, Shell EP Technology Applications and Research, P. Dumont (SPE), Issam Huneidi, Al Furat Petroleum Company, O.O. Owoeye (SPE), R.A. Hartmann (SPE), Shell Petroleum Development Company Nigeria: "Cost Savings Through an Integrated Approach to Drillstring Vibration Control". SPE/IADC 57555 (1999) 2.

S.L. Chen, K. Blackwood, Security DBS, A Halliburton Company, and E. Lamine, Consultant: "Field Investigation of the Effect of Stick-Slip, Lateral, and Whirl Vibrations on Roller Cone Bit Performance". SPE 56439 (1999) 1.

J.W. Nicholson, Shell Research B.V.: "An Integrated Approach to Drilling Dynamics Planning, Identification and Control". IADC/SPE-27537 (1994) 949.

T.M. Burgess, G.L. McDaniel & P.K. Das.: "Improving BHA Tool Reliability with Drillstring Vibration Models: Field Experience and Limitations". SPE/IADC 16109 (1987) 517-530.

Y. A. Khulief, M. A. Mohiuddin: "On the dynamic analysis of rotors using modal reduction, Finite Elements in Analysis and Design" v.26 n.1, p.41-55, May 15, 1997.

Clayer, F., Vandiver, J.K.&Lee, H.Y.: "The Effect of Surface and Downhole Boundary Conditions on the Vibration of Drillstrings". SPE 20447 (1990) 431-439.

P.D. Spanos, Rice, U. & M.L. Payne: "Advances in Dynamic Bottomhole Assembly Modeling and Dynamic Response Determination". IADC/SPE 23905 (1992) 581-590.

M.C. Apostol, G.A. Haduch, J.B. Williams: "A study to determine the effect of damping on finite-element-based, forced-frequency-response models for bottomhole assembly vibration analysis". SPE 20458, Proceedings of the 65th SPE Annual Technical Conference & Exhibition, New Orleans (1990).

A.A. Besaisow & M.L. Payne: "A Study of Excitation Mechanism and Resonances Inducing BHA Vibrations". SPE 15560 (1986) 1-10.

ASTM Standard E1049. Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis. Philadelphia, 1985.

A. Bannantine, J. J. Comer, and J. L. Handrock. *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis.* Prentice Hall, New York, 1990.

J.M. Barson and S.T. Rolfe. *Fracture and Fatigue Control in Structures.* Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2nd edition, 1987.

F. A. Bastenaire. *Etude Statistique et Physique de la Dispersion des Résistances et des Endurances a la Fatigue.* PhD thesis, Faculty of Sciences, University of Paris, Paris, France, 1960.

F. A. Bastenaire. New method for the statistical evaluation of constant stress amplitude fatigue-test results. *Probabilistic Aspects of Fatigue, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 511:3{28, 1972.*

C. Boller and T. Seeger. *Materials Data for Cycling Loading. Part B: Low-Alloy Steels.* Elsevier, ISBN: 0-444-42871-2 edition, 1987.

R.G. Carlson. *Fatigue Studies of Inconel, BMI-1335, UC-25 Metallurgy and Ceramics.* Ohio, 1959.

E. Castillo and A. Fernández-Canteli. A parametric lifetime model for the prediction of high-cycle fatigue based on stress level and amplitude. *Fatigue Fracture Engineering Material Structure*, 29:1031{1038, 2006.

E. Castillo, A. Fernández-Canteli, V. Esslinger, and B. ThÄurliemann. Statistical model for fatigue analysis of wires, strands and cables. *International Association for Bridge and Structural Engineering*, P-82/85:1{40, 1985.

E. Castillo, A. Fernández-Canteli, and A.S. Hadi. On fitting a fatigue model to data. *International Journal of Fatigue*, 21:97{106, 1999.

N.E. Dowling. *Mechanical Behavior of Materials. Engineering Method for Deformations, Fracture and Fatigue.* Pearson, New Jersey, 3rd edition, 1998.

N.E. Dowling and S. Thangjitham. An overview and discussion of basic methodology for fatigue. *Fatigue and Fracture Mechanics. ASTM STP 1389*, 31:3{36, 2000.

M. Matsuishi and T. Endo. *Fatigue of metals subjected to varying stress*. Fukuoka, Japan, 1968.

P. Starke, F. Walther, and D. Eifer. PHYBAL-A new method for lifetime prediction based on strain, temperature and electrical measurements. *International Journal of Fatigue*, 28(9):1028{1036, 2006.

L. Yung-Li, J. Pan, R. Hathaway, and M. Barkey. *Fatigue Testing and Analysis. Theory and Practice*. Elsevier. Butterworth Heinemann, Oxford, 1st edition, 2004.
J. Zhang and D.B. Kececioglu. New approaches to determine the endurance strength distribution. In *4th ISSAT International Conference on Reliability & Quality in Design*. Seattle, WA, 1998.

LISTA DE FIGURAS.

CAPÍTULO 1.

Figura 1. Aplicando Ingeniería de Fatiga.

Figura 2: Representación esquemática de una fatiga típica y algunos diferentes cuadros: a) lineal, b) semi lineal, c) no lineal.

Figura 3. Metodología del trabajo.

Figura 4. Representación esquemática de las variables B Y C.

Figura 5. Esquema de las curvas de Wöhler

Figura 6. Curva S-N para especímenes de prueba de tubería de perforación para grado S.

Figura 7. Gráfico de intensidad de esfuerzos vs crecimiento de grieta.

CAPITULO 2.

Figura 1. Amplitud constante de esfuerzos mínimos y máximos.

Figura 2. Gráfico de esfuerzo en vida, en un número de ciclos a la falla.

Figura 3. Gráfico de mecanismos continuos y estáticos donde muestra el crecimiento de grieta.

Figura 4. Gráfico de propagación de fisura.

Figura 5. La curva S-N derivada de las muestras estándar con cargas puede ser construida.

Figura 6. Representación parabólica de límite de fatiga.

Figura 7. Región de diseño segura para limitar la figura

Figura 8. Diferentes concentraciones de carga de tensión.

Figura 9. Observación empírica de la carga media de los aceros.

Figura 10. Vida de fatiga es corto en ciclos y para frecuencias es más lento.

Figura 11. Método local de vida.

Figura 12. Gráfico de propiedades mecánicas monótonas.

Figura 13. Ciclo de histéresis.

Figura 14 – Índice de Curvatura para tubería de perforación clase premium, de 5 pulgadas, 19.50 ppf, S135.

Figura 15 – Índice de Curvatura para tubería de perforación clase premium, de 5 7/8 pulgadas, 23.40 ppf, G105.

Figura 16. Índice de Estabilidad para varios de los componentes del aparejo de fondo (BHA).

Figura 17. Unión de tubería de perforación en una sección curvada del agujero.

Figura 18. Don.de se muestra el pandeo de la tubería causando una grieta.

CAPITULO 3.

Mapa Estratégico de la Aplicación de la Ingeniería de Fatiga. Versión 1.

Mapa Estratégico de la Aplicación de la Ingeniería de Fatiga. Versión 2.

Mapa Estratégico de la Aplicación de la Ingeniería de Fatiga. Versión 3.

Mapa Estratégico de la Aplicación de la Ingeniería de Fatiga. Versión 4.

Mapa Estratégico de la Aplicación de la Ingeniería de Fatiga. Versión 5.

Mapa Estratégico de la Aplicación de la Ingeniería de Fatiga. Versión 6.

Mapa Estratégico de la Aplicación de la Ingeniería de Fatiga. Versión 7.

Fundamentos de Diseño – Mejores prácticas.

Impacto del costo de la intervención en la AIF-

Costo por metro perforado de la AIF.

Índice de desviación de costos programados.

Índice de entrega de pozos con la AIF.

Instalaciones certificadas como industria limpia de la AIF.

Índice de frecuencia de problemas.

Índice de impacto de problemas.

Índice de días de espera.

Tecnología mejorada en la AIF.

Implantación del BSC en la AIF.

Pozos oportunamente diseñados con la metodología AIF en la perforación y terminación.

Participación e involucramiento de la AIF en la planeación de los proyectos de los activos.

Infraestructura administrativa, operativa y de mantenimiento modernizado.

Procesos controlados de perforación y terminación.

Personal competente de alto desempeño.

Autonomía en la administración del presupuesto.

CAPITULO 4

Figura 1. Reporte oficial de PEMEX (pimer pez).

Figura 2. Se describe los componentes de la sarta de perforación para efectuar la perforación con agujero de 17 1/2" y la ampliación a 14 1/2" x 17 1/2", así como la litología a perforada.(pimer pez).

Figura 3. Se describe los componentes del pescado en la sarta de perforación para efectuar la perforación físicamente salió a superficie sarta hasta estabilizador observándose degollamiento de dicha caja, quedando como longitud de pez 12.30 m. Comprendidos desde la barrena 17 1/2" hasta el drill collar monel con mwd 9 1/2" .

Figura 4. Piñón fracturado del estabilizador de 9 1/2" x 17 1/2" x 3" (pimer pez).

Figura 5. Razón de Rigidez.

Figura 6. Pruebas realizadas al equipo ezy torque corroborando apriete adecuado considerando dos equipo de medición.

Figura 7. Se muestra que la calidad del acero concuerda con el certificado.

Figura 8. Reporte de dureza donde se comprueba que no existe mala calidad en el acero.

Figura 9. Fenómenos asociados al movimiento de atascamiento-deslizamiento de la barrena: velocidades en la parte superior de la sarta y en la barrena, junto con el esfuerzo de torsión.

Figura 10. Vibraciones mecánicas en una sarta de perforación. Consecuencias de las mismas.

Figura 11. Parámetros de Perforación. La profundidad de 1225 m se observa vibración.

Figura 12. Simulaciones del modelo para soluciones de atascamiento-deslizamiento.

Figura 13. Se observa la litología la cual se perforó durante el primer pez, detectando posición de barrena y ampliador.

Figura 14. Se observa la litología la cual se perforó durante el primer pez, detectando posición de barrena y ampliador.

Figura 15. Se observa como los distintos cambios litológicos crean vibraciones en diferentes puntos de la sarta de perforación principalmente entre barrena y ampliador, ocasionando el rompimiento de la misma

Figura 16. Propuesta técnica del ampliador en el cual se explica que solo se debe trabajar en 100% lutita.

Figura 17. Artículo del ampliador el cual explica las condiciones de trabajo en formación dura y blanda.

Figura 18. Fotografía del ampliador, donde se observa daño por contacto de metal.

Figura 19. Fotografía del estabilizador, donde se observa daño por contacto de metal.

Figura 20. Tomado del Programa de Entrenamiento Acelerado para Supervisores "Diseño de Sartas de Perforación y de Herramientas de Fondo". Cia. Schlumberger.

Figura 21. Reporte oficial de PEMEX segundo pez.

Figura 22. Se describe los componentes de la sarta de perforación para efectuar la perforación con agujero de 17 1/2" y la ampliación a 14 1/2" x 17 1/2", así como la litología a perforada.(segundo pez).

Figura 23. Se describe los componentes del pescado en la sarta de perforación para efectuar la perforación físicamente salió a superficie sarta hasta estabilizador observándose degollamiento de dicha caja, quedando como longitud de pez 13.69 m. Comprendidos desde la barrena 17 1/2" hasta el drill collar monel con mwd 9 1/2".

Figura 24. Piñón fracturado de sustituto vcp 9 1/2" (2do. pez)

Figura 25. Se observa la litología la cual se perforó durante el segundo pez, detectando posición de barrena y ampliador.

Figura 26. Reporte oficial de PEMEX tercer pez.

Figura 27. Se describe los componentes de la sarta de perforación para efectuar la perforación con agujero de 17 1/2" y la ampliación a 14 1/2" x 17 1/2", así como la litología a perforada.(tercer pez).

Figura 28. Se observa la litología la cual se perforó durante el tercer pez, detectando posición de barrena y ampliador.

Figura 29. Parámetros de vibración en la sarta de perforación.

Figura 30. Reporte oficial de PEMEX cuarto pez.

Figura 31. Drill collar 9 1/2" fracturado en su caja (4to. pez).

Figura 32. Cálculo de rigidez del Drill Collar. Verifique en primer pez cálculo de BSR.

Figura 33. Prueba de medición de torque en conexión dc 9 1/2" con caja fracturada

Figura 34. En estas válvulas se observa que la conexión aflojó a las 95,000 lb-ft. Pruebas efectuadas en campo.

Figura 35. Muestra el torque recomendado para conexión Drill Collar.

Figura 36. Imagen del Drill Collar con el pin degollado. También se muestra el grado de dureza del material.

Figura 37. Dureza del Drill Collar tomado de American Petroleum Institute.

Figura 38. Se observa la litología la cual se perforó durante el tercer pez, detectando posición de barrena y ampliador.

Figura 39. Se observa como los distintos cambios litológicos crean vibraciones en diferentes puntos de la sarta de perforación principalmente entre barrena y ampliador, ocasionando el rompimiento de la misma.

Figura 40. Se observa que en el carga al gancho tiene un peso excesivo al cual debería de tener. El galonaje de trabajo es el adecuado de acuerdo al diámetro de la barrena y el ampliador. La presión de bombas tiene una disminución indicando el probable rompimiento de la sarta de perforación. El torque incrementa de 600 a 650 amperes lo cual demuestra un torque demasiado alta para la profundidad de perforación.

Figura 41. Se observa en forma de números los datos obtenidos a través de las gráficas de carga al cancho, galonaje, presión de bombas y torque.

Figura 42. Localización del Pozo Exploratorio Bricol 2DL, mostrando los pozos de correlación.

Figura 43. Localización del Pozo Exploratorio Bricol 2DL. Se encuentra ubicado en la Región Sur de México en el estado de Tabasco, perteneciente al municipio de Comalcalco.

Figura 44. Se describe los componentes de la sarta de perforación para efectuar la perforación con agujero piloto de 10 5/8" y la ampliación a 14 1/2" x 17 1/2", así como la litología a perforada

Figura 45. Master Log Pozo Exploratorio Bricol 2DL. Describe la litología perforada.

Figura 46. Con la barrena excéntrica se efectuó un record único a nivel mundial, donde se obtuvo un ahorro significativo en tiempo y costo.

Figura 47. Se muestra un comparativo en días con los pozos de correlación, donde se obtuvo un ahorro de 4 días durante la ampliación minimizando las vibraciones axiales, laterales y torsionales.

Figura 48. Se muestra un comparativo en ROP con los pozos de correlación, tanto con barrenas pdc y tricónicas donde BRICOL 2DL obtuvo un ROP de 11.7 metros por hora.

Figura 49. Se muestra un comparativo en ROP promedio con los pozos de correlación, donde BRICOL 2DL obtuvo un ROP de 11.7 metros por hora.

Figura 50. Se muestran los parámetros obtenidos por el vibrascope, con el peso sobre barrena y las RPM en primera corrida.

Figura 51. Se muestran los parámetros obtenidos por el vibrascope, con el peso sobre barrena y las RPM, en segunda y tercera corrida.

Figura 52. Presenta el análisis direccional del Pozo Exploratorio Bricol 2DL.

Figura 53. Se observa los gradientes de poro y fractura en la formación perforada, donde se demuestra las intercalaciones de lutita y arenisca.

Figura 54. Con la barrena pdc convencional de 12 1/4" y sarta rotatoria se obtuvo un ahorro significativo en tiempo y costo.

Figura 55. Con el uso de los sensores de vibración se detectó oportunamente las vibraciones torsionales generadas por el peso sobre barrena y las RPM.

Figura 56. Se muestra en la figura del lado izquierdo el ROP promedio obtenido durante la etapa de 12 ¼", así como el peso sobre barrena (WOB) y el torque generado. Del lado derecho se observa el gasto con el que se trabajó.

Figura 57. Se observa el WOB generado con el número de RPM y las vibraciones generadas a causa de estos parámetros, donde con el uso del vibrascope y sensores de vibración se minimizó la vibración.

Figura 58. Se muestra la influencia generada en base al uso adecuado de las RPM para minimizar las vibraciones laterales y torsionales generadas en la sarta de perforación.

Figura 59. Se muestra la influencia generada en base al uso adecuado del WOB para minimizar las vibraciones laterales y torsionales generadas en la sarta de perforación.

Figura 60. Se observan las vibraciones máximas laterales, donde solo hubo vibraciones bajas y moderadas en la barrena pdc de 12 ¼" y en la herramienta de drill collars de 8" generadas en la sarta de perforación.

Figura 61. Se observan las vibraciones máximas laterales, en la barrena pdc de 12 ¼" y en la herramienta de drill collars de 8" de color morada, detectando mínimas vibraciones generadas en la sarta de perforación.

Figura 62. Se observan las severidades torsionales, en la barrena pdc de 12 ¼" y en la herramienta de drill collars de 8" de color morada, detectando mínimas vibraciones generadas en la sarta de perforación.

Figura 63. Se muestran las vibraciones laterales y torsionales, en base al número de RPM donde se originaron movimientos armónicos naturales laterales generadas en la sarta de perforación.

Figura 64. Se describe los componentes de la sarta de perforación donde se muestra el RSS y el PWD, este último contiene integrado el sensor de vibración.

Figura 65. Master Log. Pozo Exploratorio Bricol 2DL, sección de 12 ¼".

Figura 66. Se muestran los picos de vibración generados detectados por el sensor de vibración dentro de la sarta de perforación, el cual se observa vibraciones medias como máxima vibración.

Figura 67. Se describen los componentes de la sarta de perforación en la sección de 8 ½" con un sistema rotatorio y barrena pdc de 8 ½" y el PWD donde viene integrado el sensor de vibración.

Figura 68. En esta tabla comparativa se describe el ahorro en tiempo y costo en la sección de 8 ½".

Figura 69. Se describen los componentes de la sarta de perforación en la sección de 5 7/8" con una sarta empacada estabilizada aplicando la Ingeniería de Fatiga.

Figura 70. En esta tabla comparativa se describe el ahorro en tiempo y costo en la sección de 5 7/8".

Figura 71. Configuración de la sarta de perforación donde se muestran los problemas de vibración.

Figura 72. Estructura plana con elementos conectados rígidamente.

Figura 73. Elemento tipo viga.

Figura 74. Imagen de herramienta Black Box.

Figura 75. Imagen del estabilizador con rodillos.

Figura 76. Imagen del amortiguador.

Esquema 1. Esquema final del análisis causa raíz primer pez, 1234 m.

Esquema 2. Esquema final del análisis causa raíz primer pez, 1234 m. Conclusión por alta vibración.

Esquema 3. Esquema final del análisis causa raíz segundo pez, 1272 m. Conclusión por alta vibración.

Esquema 4. Esquema final del análisis causa raíz tercer pez, 1397 m. Conclusión por alta vibración.

Esquema 5. Esquema final del análisis causa raíz tercer pez, 1397 m. Conclusión por alta vibración.

LISTA DE TABLAS.

CAPITULO 1.

Tabla 1. Diferentes historias de carga utilizadas para el análisis del daño acumulado.

CAPITULO 4.

Tabla 1. Muestra el reporte de inspección del estabilizador por Tubocospe.

Tabla 2. Muestra el torque adecuado para cada junta de Drill Collar.

Tabla 3. Muestra el torque adecuado para cada junta de Drill Collar.

Tabla 4. Reporte siop del dia 19/05/2011 del equipo pm-305.

CAPITULO 5

Tabla 1. En esta tabla comparativa se describe los costos calculados para cada etapa de la perforación,

Tabla 2. Se describe los costos por operación de una pesca mostrando los costos directos e indirectos, esta pesca representa el 2% del costo total de la perforación de un proyecto,

Tabla 3. Se describe los costos al aplicar las herramientas que constituyen la Ingeniería de Fatiga el cual representa el 4% del costo total del proyecto,

Fotografía 1. Personal que laboró y participó en la perforación exitosa del Pozo Exploratorio Bricol 2DL.