

MANIFESTACIÓN DEL FENÓMENO DE HISTÉRESIS EN BOMBAS DE CAVIDADES PROGRESIVAS (PCP) EN EL YACIMIENTO DIADEMA, CUENCA DEL GOLFO SAN JORGE. ARGENTINA

Marcelo Hirschfeldt
Compañías Asociadas Petroleras S.A. Argentina

Abstract

El presente trabajo describe la experiencia desarrollada en el análisis de fallas en bombas de cavidades progresivas (PCP) en el Yacimiento Diadema, en la Cuenca del Golfo San Jorge. Se analizará la manifestación del fenómeno de Histéresis en elastómeros que conforman el estator de las bombas de cavidades progresivas y sus consecuencias.

Las características abrasivas del fluido y la madurez de los proyectos de Recuperación Secundaria hicieron de la PCP la mejor alternativa (costo/beneficio) para producir dichos fluidos.

Estas bombas con altos caudales de extracción en pozos con casing de Ø 51/2", se encuentran sometidas a determinadas exigencias (altos regímenes de extracción) debido a las restricciones que impone el casing a la capacidad extractiva de las mismas, reduciendo en consecuencia su vida útil.

La Histéresis en elastómeros (fatiga del elastómero) provoca diversos efectos como: incremento de la temperatura en el interior de los lóbulos del estator, pérdida progresiva de las propiedades elásticas del mismo e incremento en la rigidez.

Esta presentación describirá la identificación de fallas de estas características, su manifestación y las consecuencias hacia otros elementos del sistema; incluirá las acciones tomadas para minimizar la influencia de las variables más importante que forman parte del fenómeno.

El estudio se realizó sobre 60 pozos de iguales características (Elastómero NBR, 46 m³/día @ 100 RPM y 120 kg/ cm² de presión máxima) analizándose: historia de regímenes de extracción (RPM), controles de producción, medición acústica de nivel dinámico, medición de torque a través del variador de frecuencia y el posterior análisis de los estatores a partir de cortes transversales.

Introducción al Yacimiento Diadema

El Yacimiento Diadema tiene una extensión de 9.406 Hectáreas y está ubicado en la Provincia del Chubut a 27 Km. de la ciudad de Comodoro Rivadavia (**Fig.1**). El primer pozo fue perforado por la empresa Shell en el año 1922 y el desarrollo comenzó tres años más tarde.

La perforación por parte de esta compañía se extendió hasta el año 1960, totalizando 776 pozos. El objetivo principal de estos sondeos fue explotar los complejos superiores con una profundidad media de 1.100 metros.

En septiembre de 1977 la empresa CAPSA adquirió el yacimiento cuando la producción era de 129 m³/día y se habían extraído un total de 19,4 Millones de m³ de petróleo.

La actividad de CAPSA se orientó desde sus comienzos a la ampliación y desarrollo de las reservas mediante la perforación y reparación de los pozos; basándose la perforación en una primera etapa en los niveles más profundos.

Posteriormente, CAPSA comenzó las actividades de recuperación secundaria en 1988 con la ejecución del primer proyecto piloto; a continuación se desarrollaron proyectos de recuperación secundaria de mayor envergadura.

Estado actual de la Producción:

- 1.650m³ /día producción neta de petróleo
- 40.000 m³ /día producción bruta
- 25 Millones de m³ de petróleo acumulados

- 372 pozos productores de petróleo
- 194 pozos inyectoros (38.350 Mm3/día de agua inyectada)

El sistema PCP en el Yacimiento Diadema

La primera bomba PCP fue instalada en el año 1986 y su número fue evolucionando progresivamente hasta llegar a 245 PCP instaladas en el año 2003.

A continuación se detalla la información referida al sistema PCP en el Yacimiento Diadema:

- número de PCP en marcha: 245 (sobre un total de 372 pozos productores)
- profundidad promedio: 950 m
- diámetro de casing: 5 ½"
- diámetro de tubing: 2 7/8"
- varillas de bombeo : 1"x 25' y Hollow Rod 48 mm
- rango de caudal de bombas: 30 -250 m3/d
- máximas RPM : 450
- rango de presión de bombas: 100-150 kg/cm2
- geometría de bombas: single lobe
- interferencias: estándar y undersize
- elastómero: NBR- Nitrílico convencional

En sus comienzos, la PCP permitió producir fluidos tales que otros sistemas de extracción artificial no podían lograr, como fluidos altamente viscosos y con altos contenidos de arena los cuales se realizan generalmente a bajos caudales.

Con el incremento de los caudales a extraer y con el aumento de los % de agua, característica común en yacimientos afectados a Recuperación Secundaria, las PCP fueron sometidas en el Yacimiento Diadema a condiciones de operación severas:

- Altas RPM
- Producción de fluidos con altos % de agua(baja lubricación)
- Producción de fluidos con alto contenido de sólidos

Conceptos básicos del sistema PCP

A fines de los años '20, Rene Moineau desarrolló el concepto para una serie de bombas helicoidales.

Una de ellas tomó el nombre con el cual hoy es conocido, *Progressing Cavity Pump (PCP)*.

La PCP está constituida por dos piezas longitudinales en forma de hélice, una que gira en contacto permanente dentro de la otra que está fija, formando un engranaje helicoidal:

1. El rotor metálico, es la pieza interna conformada por una sola hélice
2. El estator, la parte externa está constituida por una camisa de acero revestida internamente por un elastómero(goma), moldeado en forma de hélice enfrentadas entre sí, cuyos pasos son el doble del paso de la hélice del rotor. **(Fig.2)**.

El estator y el rotor no son concéntricos y el movimiento del rotor es combinado, uno rotacional sobre su propio eje y otro rotacional (en dirección opuesta a su propio eje) alrededor el eje del estator.

La geometría del conjunto es tal, que forma una serie de cavidades idénticas y separadas entre sí. Cuando el rotor gira en el interior del estator estas cavidades se desplazan axialmente desde el fondo del estator (succión) hasta la descarga, generando de esta manera el bombeo por cavidades progresivas. Debido a que las cavidades están hidráulicamente selladas entre sí (interferencia), el tipo de bombeo, es de desplazamiento positivo. **(Fig.3)**:

La geometría del sello helicoidal formado por el rotor y el estator están definidos por los siguientes parámetros**(Fig.4-5)**:

- D:** diámetro mayor del rotor(diámetro nominal)
- d:** diámetro de la sección transversal del rotor
- E :** excentricidad del rotor
- Pe:** paso del estator (long de la cavidad = long de la etapa)

Pr: paso del rotor

Introducción a las propiedades de los elastómeros sintéticos

Los elastómeros sintéticos fueron creados a partir de la necesidad de brindar a los elastómeros naturales, resistencia al petróleo y a las condiciones de operación que la extracción de estos productos exige. Los elastómeros sintéticos son materiales elásticos que se producen a partir de la polimerización sintética de un monómero de carbono, que luego del agregado de reforzantes, aditivos y un proceso de curado, se obtiene el producto final.

Dentro de los mas importantes podemos encontrar los *Fluoe elastómeros*, *Base Nitrilo Hidrogenados* y *los de Base Nitrilo convencional (Buna N o Caucho de Nitrilo)*, siendo éstos últimos los mas comunes en la industria petrolera. Las propiedades químicas y mecánicas de los elastómeros depende básicamente de la formulación de los mismos. Entre estas propiedades podemos enumerar: Dureza, Elasticidad, Resistencia a la abrasión, Resistencia a la tensión y elongación, resistencia al desgaste y resistencia a la fatiga.

Características del Elastómero Base Nitrílica (Buna N)

El elastómero de nitrilo convencional está formulado especialmente para resistir el ataque de los hidrocarburos. Está constituido por un copolímero de butadieno y Acrilo-Nitrilo (ACN), siendo este último compuesto el que le aporta las propiedades necesarias para afrontar los requerimientos de la explotación de petróleo. El contenido de ACN en los elastómeros industriales está comprendido entre 18 y 50 %, produciendo diferentes efectos sobre sus características y propiedades:

- Dureza (aumenta)
- Resistencia a la abrasión (aumenta)
- Resistencia térmica (aumenta)
- Resistencia a la acción química de los fluidos transportados (aumenta)
- Resilencia y elasticidad (disminuye)

Introducción a las propiedades mecánicas dinámicas de los elastómeros

El elastómero es un compuesto que posee propiedades “visco-elásticas”, dicho en otras palabras, en un proceso de deformación cíclica el elastómero tiene la habilidad única de almacenar y disipar energía simultáneamente. Las gomas sintéticas, en la mayoría de sus aplicaciones, son sometidas a cierto grado de deformación cíclica o absorción de cargas, situación típica observada en la operación de una PCP.

La base de esta discusión se centra en que las propiedades mecánicas dinámicas de una goma sintética sometidas a una deformación (< 25%) son independientes a la magnitud de la deformación. Al contrario, son fuertemente dependiente de la arquitectura molecular, temperatura, frecuencia de deformación y componentes varios.

Los datos de las propiedades dinámicas mecánicas son obtenidas a través de ensayos de desplazamiento de la goma (compresión o tensión) aplicando una deformación sinusoidal cíclica, llamado Módulo de elasticidad Complejo (E^*) o Stress total.

Este módulo está compuesto por:

E' Módulo de elasticidad. Componente elástica. (energía recuperable) que se encuentra en fase con el desplazamiento

E'' Módulo de elasticidad. Componente viscosa. (energía irre recuperable).

Para una deformación sinusoidal, la relación entre la componente viscosa (E'') y la componente elástica (E') esta representado por la relación $\tan \delta$ (Tan delta).

$$\tan \delta = E'' / E'$$

Un bajo valor de Tan delta es sugerido cuando el elastómero es sometido a cargas cíclicas; contrariamente, un alto Tan delta es preferido en aplicaciones donde las cargas son intermitentes o aleatorias.

Como se expresó anteriormente, el contenido de ACN ayuda al elastómero a adquirir propiedades y características especiales para resistir la exigencias operativas de la bomba PCP. La contrapartida del agregado es que cuanto mayor es el contenido de ACN en el elastómero, menor es la elasticidad y la resiliencia del mismo, aumentando la componente viscosa y en consecuencia el almacenamiento de energía en su interior (aumenta el Tan delta) (**Fig. 6**)

Introducción al fenómeno de Histéresis

Cuando una bomba PCP es instalada en un pozo, el elastómero está sometido a la temperatura del pozo propiamente dicha, la cual provoca el hinchamiento de la goma y el consecuente aumento de la interferencia entre rotor y estator (**Fig. 7**). Una vez comenzada la rotación del rotor dentro del estator (**Fig. 8**), este último se ve sometido a una deformación cíclica (Esfuerzo-Deformación), donde parte de la energía se recupera elásticamente y la pérdida de la misma es almacenada en forma de calor. La interacción molecular dentro del lóbulo y la baja conductividad térmica del elastómero dan como resultado un incremento de temperatura en el interior del mismo.

A este proceso dinámico de almacenamiento de energía se le llama Histéresis (Heat Build Up).

Cuando la temperatura excede la admisible por elastómero, el mismo comienza a perder propiedades mecánicas con la consecuente disminución de la vida útil. Esta temperatura es consecuencia de los efectos mecánicos (calor almacenado) y térmicos (temperatura del fondo de pozo) (**Fig. 9**).

Este fenómeno se puede representar como un proceso espiralado que converge a la degradación de las propiedades mecánicas del elastómero (**Fig. 10-11**).

Dentro de las variables mas importantes que influyen en la manifestación del efecto térmico por histéresis podemos enumerar:

- a) **Interferencia entre rotor y estator (ajuste)** : *Determina la magnitud de la deformación (Fig. 3).*
- b) **Revoluciones por minuto del rotor(RPM)** : *Determina la frecuencia de deformación*
- c) **Diferencia de presión por etapa** : *Compresión del lóbulo*
- d) **Caudal de fluido y % de agua** : *Controla la disipación de calor*

Manifestación del fenómeno de Histéresis en el Yacimiento Diadema.

En la medida que los caudales a extraer de los pozos se acrecentaron por la madurez de los proyectos de recuperación secundaria, fueron aumentando los regímenes de extracción (RPM). Dicha modificaciones en las RPM, junto con una alta interferencia entre rotor y estator provocó la aparición de los primeros indicios del fenómeno de Histéresis. Esto se pudo observar en forma directa en el cambio de la dureza en el centro del lóbulo, pasando de una dureza de 75 Shore A (valor normal para un elastómero de este tipo) a 100 Shore A en el interior (máximo de la escala Shore). (**Fig. 12**).

Este fenómeno afectó directamente en la rigidez del elastómero provocando un aumento en la interferencia entre rotor y estator, y en el torque resistivo medido en las varillas de bombeo en superficie (debido a la mayor fricción entre rotor y estator) (**Fig. 13**).

Caso I . Pozo D-238

En el pozo D-238 ,durante los primeros 150 días de funcionamiento el régimen de extracción no superó las 350 RPM. A partir de ese momento y tras el incremento del régimen a las 400 RPM, se comenzó a apreciar un incremento progresivo en el torque total medido en las varillas de bombeo a través de los parámetros eléctricos del variador de frecuencia. Cabe acotar que a partir de ese momento no se manifestó cambios significativos en los niveles dinámicos de fluido, ni en los caudales, lo que significaría que el torque hidráulico se mantuvo constante.

Debido a que:

$$\text{Torque Total} = T(\text{hidráulico}) + T(\text{resistivo}) + T(\text{fricción en la bomba})$$

T (hidráulico): función de (presión de boca de pozo, presión por fricción en el interior de los tubings , presión por nivel dinámico)

T (resistivo): fricción entre varillas y tubing.

T (fricción en la bomba): fricción entre rotor y estator (puede incrementarse tras el aumento de la interferencia por hinchamiento y endurecimiento de elastómero, entre otros factores)

podemos decir que el incremento de torque a partir de los 150 días de funcionamiento se debió al aumento de la interferencia entre el rotor y el estator por el endurecimiento de elastómero, lo que resultó en el aprisionamiento del rotor a los 305 días de funcionamiento.

Al realizar cortes transversales del estator se observó endurecimiento y desprendimiento del elastómero en la zona central, así como el despegue de la goma del “housing” metálico. **(Fig. 14).**

Caso II. Pozo D-51

En el pozo D-51 los cambios realizados en el régimen de extracción, así como el incremento del torque total se asemeja a los descritos en el pozo D-238. El resultado final luego de 360 días de funcionamiento fue la rotura del elastómero debido al endurecimiento del mismo, aprisionamiento del rotor y la posterior pesca de la unión de la varilla de bombeo. **(Fig. 15).**

Conclusiones

La observación del fenómeno de Histéresis en distintos pozos del Yacimiento Diadema, con condiciones de operación e instalaciones similares a las descritas, permitió focalizar las acciones de mejora y efectuar modificaciones en el sistema para optimizar la vida del mismo.

Los cambios fueron implementados en forma progresiva y apuntaron a los siguientes puntos:

- Utilización de rotores de menor diámetro para disminuir de esta forma la interferencia con el estator. La interferencia actual de estas bombas permite alcanzar hasta un 60 % de la eficiencia volumétrica a la presión máxima de trabajo en el banco de pruebas.
- Se diseñó en conjunto con una de las fábricas, bombas de mayor número de etapas (menor sometimiento de los lóbulos del estator a la presión), mayor paso y menor excentricidad, para poder hacer frente a los requerimientos de los pozos de caudales mayores a los 200 m3/d.
- Nuevos Elastómeros con menor contenido de ACN

Todas estas innovaciones fueron implementadas en forma gradual y se encuentran en proceso de evaluación.

Referencias

- “ *New Applications for Wellbore Progressing Cavity Pumps*” SPE 35541
R.A.R Mills, SPR & Gaymard, SPE, Kudu Industries Inc
- “*Progressing Cavity Pumping Systems: design, operation and performance optimization*”
C-FER,
- “*Principios Fundamentales para diseño de sistemas con Bombas de Cavidades Progresivas*”
Francesco P. Ciulla, Weatherford
- “*Stator Life of a positive displacement down-hole drilling motor*”
Majid S.Delpassand, R&M Energy Systems A Unit of Robbins & Myers, Inc
- “*Speciality Synthetic Rubbers*”
Daniel L. Hertz, Jr. Handbook of elastomers
- “*Introducción al sistema de bombas de cavidades progresivas*”
Marcelo C. Hirschfeldt. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Argentina
- www.oilproduction.net “ *Todo sobre el Upstream*”
de Marcelo C. Hirschfeldt.

Figura 1



Figura 2



Figura 3



Figura 4

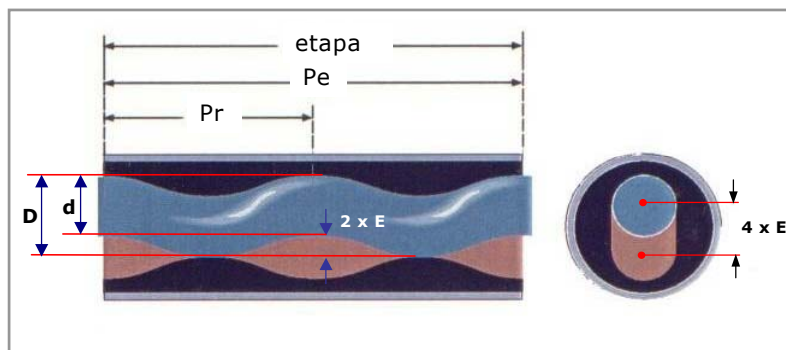


Figura 5

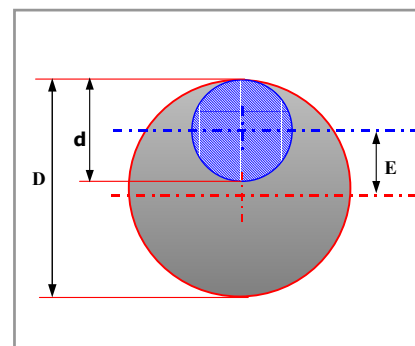
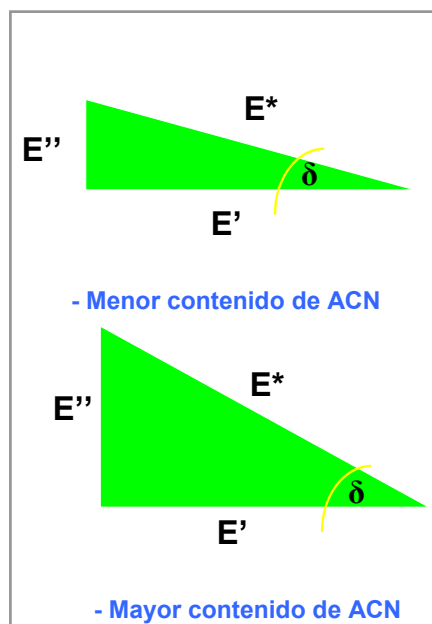
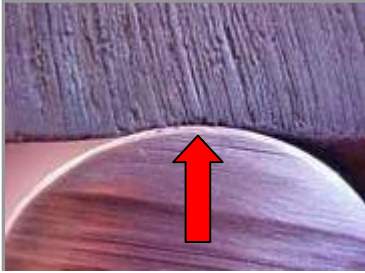


Figura 6



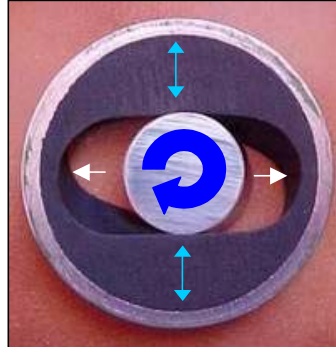
- Representación de las propiedades mecánicas dinámicas.

Figura 7



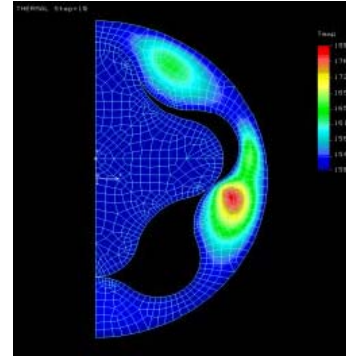
- Representación de la interferencia (ajuste) entre rotor y estator

Figura 8



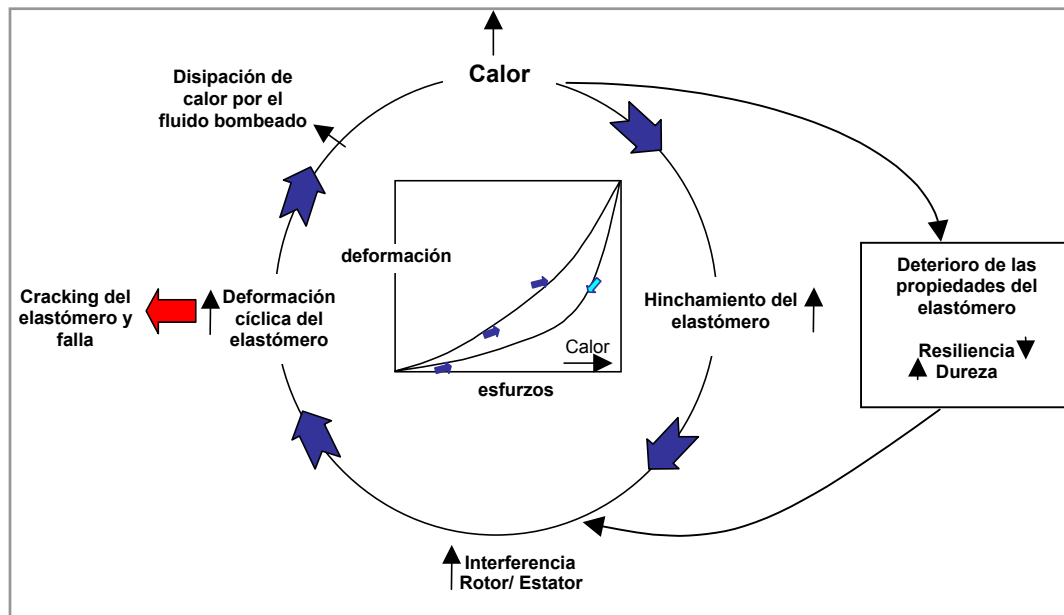
- Sección transversal de un estator y rotor

Figura 9



- Simulación termográfica de un corte transversal de estator

Figura 10



- Ciclo de la falla de Histéresis

Figura 11

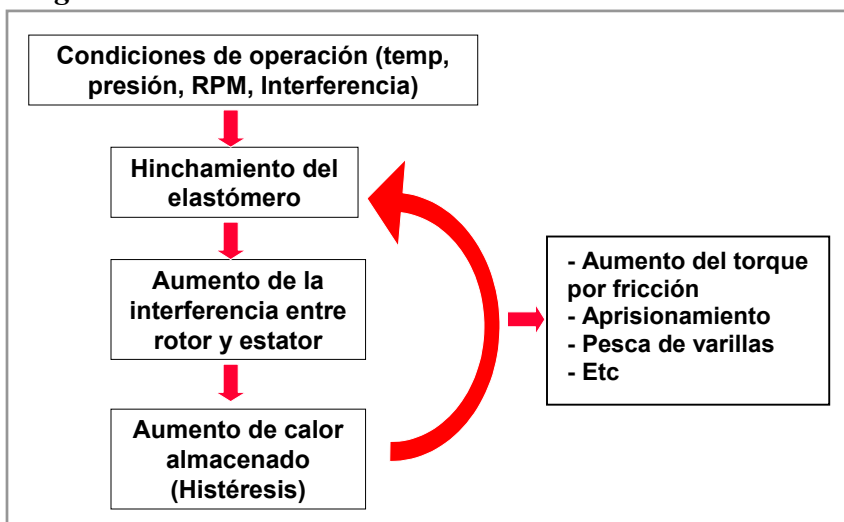
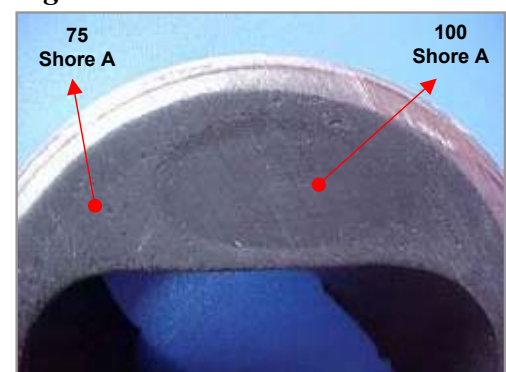


Figura 12



- Comparación de dureza del elastómero afectado

Figura 13



1- Endurecimiento del centro del lóbulo



2- Comienzo del desprendimiento del elastómero, debido a la rigidez del mismo



3- Desprendimiento profundo y falta de adherencia a la camisa del estator.



4- Proyección del desprendimiento a lo largo del lóbulo.



- Ejemplo de roturas de elastómeros en el Yacimiento Diadema

Figura 14

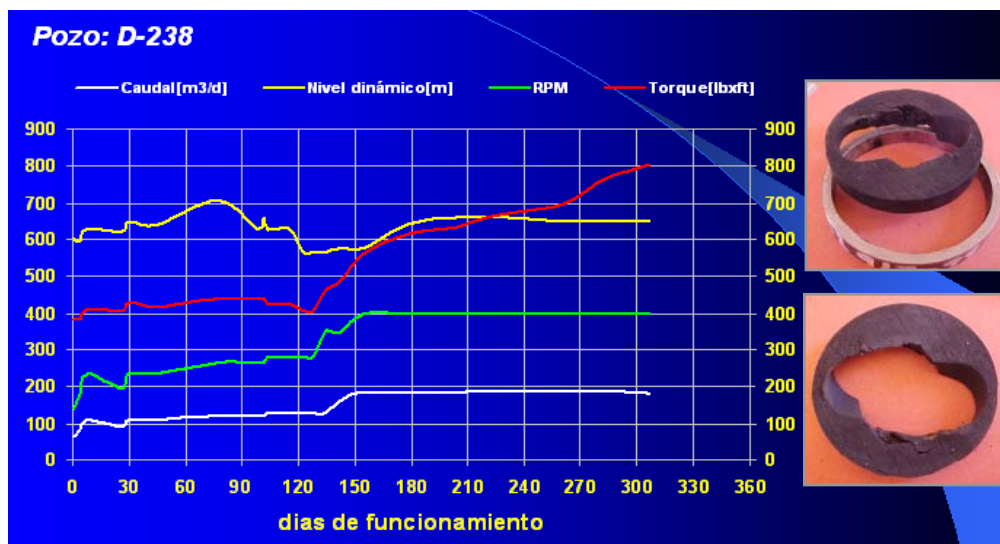


Figura 15

