

# Análisis De Falla De Las Paletas De Una Bomba De Desplazamiento Positivo

## Failure Analysis of vanes of a Positive Displacement Pump.

Nairo Julián Rodríguez Ballesteros

SENNOVA- GICEMIN, Centro Minero Morca Regional Boyacá, Sogamoso, Colombia

Correo-e: narodriguezb@sena.edu.co

**Resumen**— En una bomba de desplazamiento positivo se presentó un fenómeno de desgaste acelerado, el cual llevó a la unidad de bombeo a presentar altos niveles de vibración, provocando que la unidad saliera de operación por disparo de alarmas por alta vibración. Para encontrar la causa del problema se inició con el análisis de los registros espectrales de vibración, en los cuales se evidencio actividad armónica, lo cual permitió concluir que el exceso de vibración en la bomba estaba relacionado a la condición de las paletas, el siguiente paso fue intervenir la bomba para la extracción de las mismas, encontrando evidencia de desgaste en las zonas de contacto. Sobre las paletas falladas se realizó estudios de composición química, metalografía y dureza. En la microestructura del material de las paletas se evidencio inclusiones de plomo correlacionadas al proceso de fabricación por fundición por moldeo, condición propicia para concentración de esfuerzos lo cual afecta el comportamiento del Sistema tribómetro de las paletas, como conclusión se recomienda cambiar el proceso de fabricación de las paletas por un proceso de fundición por laminado y mecanizado con el fin de evitar las inclusiones en su microestructura.

**Palabras clave**— Bomba de desplazamiento positivo, Desgaste, esfuerzos, inclusiones, vibración.

**Abstract**— In a positive displacement pump there was a phenomenon of accelerated wear, which caused the pump unit to exhibit high levels of vibration, causing the unit to leave operation by triggering alarms by high vibration. To find the cause of the problem, we started with the analysis of spectral vibration registers, in which harmonic activity was evidenced, which allowed to conclude that the excess vibration in the pump was related to the condition of the vanes, the next step was to intervene the pump for the extraction of the same, finding evidence of wear in the contact zones. On the failed vanes studies of chemical composition, metallography and hardness were carried out. In the microstructure of the vane material, it was evidenced inclusions of lead correlated to the manufacturing process by casting by molding, a propitious condition for concentration of efforts which affects the behavior of the system tribometer of the vanes, as conclusion it is recommended to change the manufacturing process of the blades by a process of casting by rolling and machining in order to avoid inclusions in its microstructure.

**Key Word** —Inclusions, Positive displacement pump, stress, vibration, wear,

## I. INTRODUCCIÓN

Las Bombas Hidráulicas de Paletas, son bombas volumétricas, compuestas, por un rotor, paletas deslizantes y una carcasa, las paletas deslizan en un cilindro con ranuras radiales en el rotor, debido a la fuerza centrífuga estas son expulsadas de las ranuras, entrando en contacto tribológico con la camisa de la bomba y el fluido en movimiento [1], con el exceso de trabajo estas paletas se desgastan disminuyendo la eficiencia volumétrica de la bomba. Las vibraciones han sido asociadas generalmente a fallas mecánicas (desgaste, mal funcionamiento, ruido y daños estructurales), el monitoreo del nivel de las vibraciones en los equipos rotativos ha permitido estructurar mantenimientos más efectivos y menos costosos [2].

Las vibraciones en la maquinas se provocan por fuerzas excitadoras, la magnitud de la vibración en la maquina no solo depende de la fuerza sino de las propiedades del sistema y ambas de la velocidad; la vibración puede ser utilizada para identificar los defectos de diseño, fabricación, instalación o por desgaste mecánico, [3].

En este tipo de bombas es característico el desgaste adhesivo, se presenta en dos superficies que están en contacto deslizante, provocado por dos sólidos que se deslizan uno sobre el otro bajo presión, normalmente trae como consecuencias: reducción de la eficiencia de operación, pérdidas de potencia por fricción, incremento del consumo de lubricantes, eventualmente conduce al reemplazo de componentes desgastados [4]. Los modos de falla comunes en paletas de bombas hidráulicas son fractura por sobrecarga, fatiga térmica o sobrecalentamiento de corta duración, así como el desgaste acelerado o localizado. Para determinar el mecanismo de falla que se presenta en un determinado caso, se recomienda llevar a cabo análisis metalográficos, de composición química y dureza, esto para detectar posibles alteraciones en la estructura del material de las paletas. Las bombas son equipos rotativos que deben cumplir con unas condiciones de operación acordes a la norma ISO 10816 [5]. El caso del que se ocupa el presente trabajo corresponde al de una estación de bombeo de recuperación de natas en una facilidad del sector petrolero.

La bomba lleva operando a la fecha 2 años, el proceso consiste en mantener el nivel de agua (interface agua – crudo) en un tanque mientras hay un flujo que ingresa y otro que sale. El crudo que se va separando y que trata de subir al nivel superior rebosa a un compartimiento interno, en donde fluye por gravedad al tanque de recolección de natas y desde ahí es bombeado cuando este tanque alcanza su máxima capacidad operativa. Los problemas de alta vibración comenzaron su aparición al año de su instalación; las paletas que han fallado han sido reemplazadas en paradas no programadas, generando sobre costos propios de esta situación, Las paletas presentan un desgaste acelerado de la parte superior foto 1, se presumía que la posible causa de este daño eran los sólidos que es transportado por el fluido.

Por lo cual se inició el estudio que en este trabajo se resume, cuyos objetivos fueron el determinar el mecanismo de falla de las paletas, su causa raíz y generar las recomendaciones necesarias para minimizar la recurrencia de la falla en el futuro.

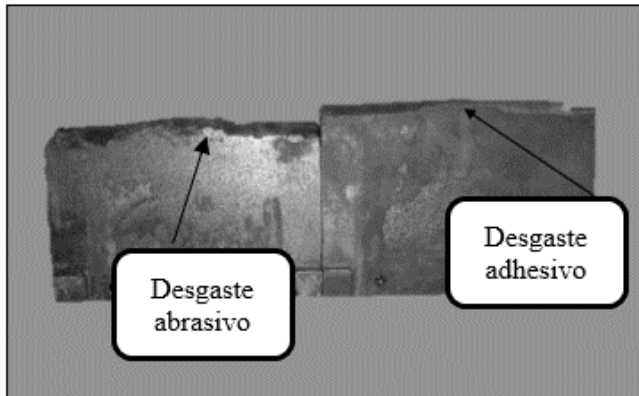


Foto 1. Paletas bomba hidráulica. Fuente: Autor del proyecto

Para tal efecto se llevaron a cabo estudios de composición química, metalografía, y dureza sobre las zonas falladas de algunos de las paletas retiradas en los mantenimientos correctivos, lográndose determinar el mecanismo de falla y establecer su causa raíz en un problema de fabricación, lo cual se describe a continuación.

## II. CONTENIDO

### A. Análisis de vibraciones

Para captar y analizar las frecuencias propias de la máquina de forma continua se utilizó un analizador de vibraciones Microlog Analyst SKF serie GX. Teniendo en cuenta lo recomendado en la norma ISO 10816, se tomaron los siguientes puntos de medición, Fig. 1.

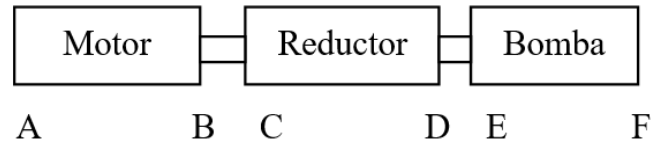


Fig 1. Puntos de medición. Fuente: Autor del proyecto

En los 6 puntos seleccionados Fig. 1 se tomaron datos en los tres ejes: horizontal, vertical y axial, en desplazamiento, velocidad, aceleración y envolvente, Tabla 1.

Punto	Desplazamiento (Mils)	Velocidad (in/s)	Aceleración (G)	Envolvente gE
Ax	0,357	0,029	0,262	0,212
Ay	---	0,040	---	---
Az	---	0,029	---	---
Bx	0,485	0,061	0,341	0,196
By	---	0,089	---	---
Bz	---	0,046	---	---
Cx	0,238	0,095	0,964	0,657
Cy	---	0,067	---	---
Cz	---	0,075	---	---
Dx	0,326	0,101	0,963	0,771
Dy	---	0,055	---	---
Dz	---	0,050	---	---
Ex	0,486	0,146	2,731	2,879
Ey	---	0,198	---	---
Ez	---	0,129	---	---
Fx	1,285	0,149	3,119	3,212
Fy	---	0,144	---	---
Fz	---	0,162	---	---

Tabla 1. Datos vibración. Fuente: Autor del proyecto

Evaluando los valores obtenidos tabla 1 se observan resaltados los datos de velocidad con valores dentro del rango de severidad en la zona C según norma ISO 10816- Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts, [5].

Se registraron valores normales de vibración en velocidad en los sentidos horizontal, vertical y axial en motor, los valores moderados de vibración en reductor, son influenciados por vibración proveniente de la bomba. Valores globales inferiores a 0,100 in/s, para ambos componentes

La fuerza motriz de la bomba es suministrada por un motor eléctrico marca Maratón electric, de siguientes características Tabla 2.

Parámetros	Valores
Velocidad	1762 rpm
Voltaje	460 V
Frecuencia	60 Hz
Potencia	40 hp

Tabla 2. Parámetros Motor Eléctrico Fuente: Autor del proyecto  
La bomba - motor están acoplados por un reductor, Nord modelo SK52-W, con parámetros de operación mostrados en la tabla 3.

Parámetros	valores
Reducción	4,61
Par salida	770 N-m
Potencia motor	40 Hp
Velocidad motor	1750 rpm
Velocidad salida	380 rpm

Tabla 3. Parámetros Reductor. Fuente: Autor del proyecto

Analizando los datos y los espectros en envolvente y aceleración tabla 1 y Fig. 3, se observan valores altos de vibración, actividad multiarmónica, relacionada con múltiplos pares de 6X, valores globales de hasta 3 G's espectros asociados con desgaste de paletas de la bomba.

Analizando los datos y los espectros en velocidad tabla 1 y Fig. 2 se observan valores moderados de vibración en sentidos horizontal, vertical y axial en la bomba se registraron valores globales hasta 0,198 in/s, espectros dominados por múltiplos armónicos a 2X, el valor de amplitud a la frecuencia de paso 6X, no muestra relevancia, sin embargo, sus múltiplos armónicos, muestran amplitudes relevantes (24X y 36X), frecuencias de falla relaciona con el paso de paletas.

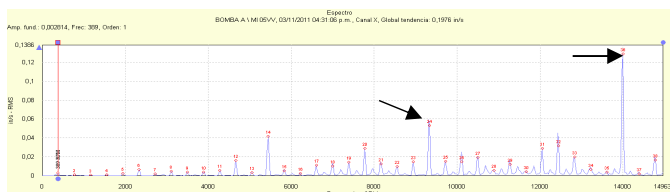


Fig 2. Espectro en velocidad bomba lado acople vertical punto Ey. Las flechas negras señalan los picos de 24X y 36X, múltiplos de 6X Fuente: Autor del proyecto

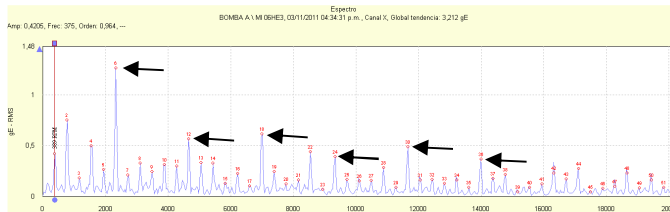


Fig 3. Espectro en Envolvente bomba lado libre Ex. Las flechas negras señalan los picos múltiplos de 6X. Fuente: Autor del proyecto

### B. Inspección Visual

Se presenta un desgaste acelerado de la parte superior, dejando un resalte en la parte central, que corresponde a las canales de succión y descarga de la bomba, Foto 2, esta condición geométrica del anillo determina una distribución no uniforme de esfuerzos sobre el área de contacto de las paletas.

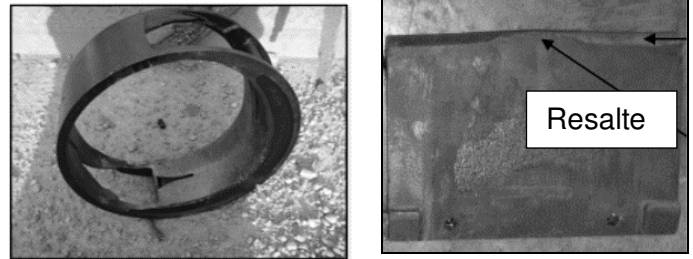


Foto 2. Configuración geométrica del anillo - Resalte central sobre la paleta. Fuente: Autor del proyecto

### C. La Composición Química Bronce

Se relaciona la composición química del bronce, tabla 4. El análisis químico realizado al material de las paletas de bronce, permitió verificar que el contenido de los elementos (% en peso) está dentro de los intervalos de composición química establecidos para un bronce al plomo C93700 designación UNS.

Cu	Zn	Pb	Sn	Ni	Sb	Si	Sp	P
79,8	0,3	10,0	9,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 4: Composición química Bronce % en peso. Fuente: Autor del proyecto

Según la composición química es un bronce para uso de cojinetes de alta velocidad y alta presión, utilizado normalmente en bombas, impeler, aplicaciones resistentes a la corrosión, desgaste entre otras.

### D. Metalografía

La metalografía se le realizó al material de las paletas Bronce, uno de los materiales de las paletas de la bomba hidráulica. En la foto 3 a y b, el bronce no fue atacado para observar con más claridad la dispersión del plomo que se encuentra en la matriz. En la microestructura se observa segregación dendrítica típica de un material fundido en molde flechas azules foto 3 c, este material contiene plomo poco distribuido y formando aglomerados en la matriz (flechas rojas), la cual consiste de una solución sólida de cobre y estaño, se observa cavidades en negro (flechas amarillas), son vacíos que alojaban plomo, desalojados en el proceso de pulido, análogo al desgaste real.

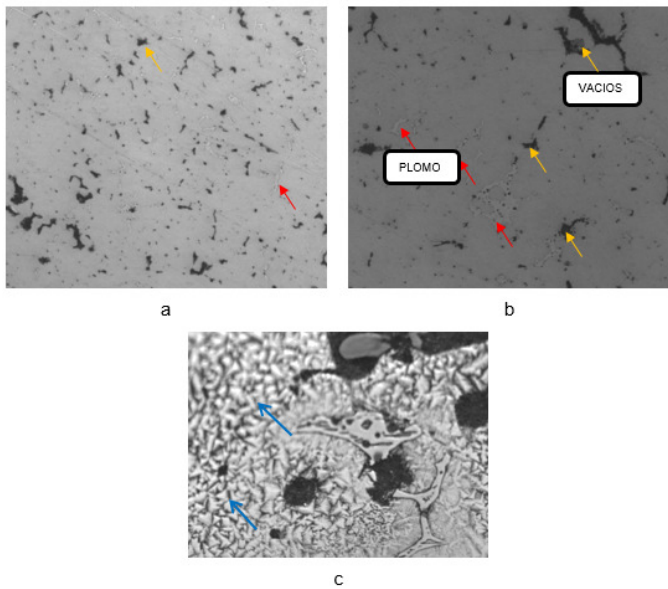


Foto 3: Metalografía del bronce a) 100x b) 200x c) metalografía, flechas amarillas son vacíos que alojaban plomo, flechas rojas son aglomerados de plomo, flechas azules segregación dendrítica. Fuente: autor del proyecto

El plomo es un material blando, por tanto, entre más cantidad de plomo y menos estaño tenga el bronce, menor será su dureza. El plomo es un material lubricante sólido que disminuye el cociente de fricción de los materiales en contacto.

*E. Dureza en el bronce*

Las pruebas de dureza sobre el bronce, se realizaron aplicando una carga fija de 100 Kg con un penetrador de punta de bola de 1/16” sobre la superficie lisa de la muestra. Las medidas de dureza se tomaron en la superficie del material en sección transversal, esta dirección fue tomada para tener un promedio más real de la lectura de dureza. Los resultados de las durezas se relacionan en la tabla 5.

MEDICION	ROCKWELL B
1	70
2	72
3	69
4	67
5	70
Promedio	69,
Desviación estándar	1,48

Tabla 5: Dureza de bloque Bronce. Fuente: Autor del proyecto

*F. Análisis de esfuerzos sobre la paleta*

El estudio estático se realizó en la paleta de la bomba hidráulica, teniendo como referencia la posición de la paleta donde las fuerzas son máximas, Fig. 4, la simulación estática,

calculó desplazamientos, fuerzas de reacción, deformaciones unitarias, tensiones y la distribución del factor de seguridad.

En el análisis estático lineal se consideraron las siguientes suposiciones:

Suposición estática. Las cargas permanecen constantes sin variación en el tiempo. Esta suposición permite ignorar las fuerzas inerciales y de amortiguación debido a pequeñas aceleraciones y velocidades poco significativas.

Suposición de linealidad. La relación entre cargas y respuestas inducidas es lineal. Si se duplican las cargas, la respuesta del modelo (desplazamientos, deformaciones unitarias y tensiones) también se duplica. Se puede realizar la suposición de linealidad ya que:

Los desplazamientos inducidos son lo suficientemente pequeños como para ignorar el cambio en la rigidez causado por la carga.

Las condiciones de contorno no varían durante la aplicación de las cargas, las cargas son constantes en cuanto a magnitud, dirección y distribución, no cambian mientras se deforma el modelo.

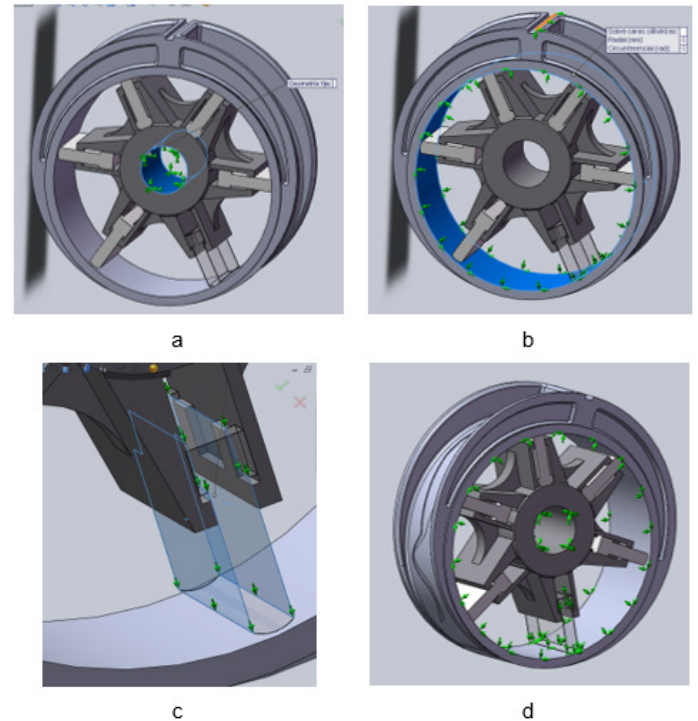


Fig 4: Sujeción en el conjunto Anillo Rotor Paleta a) Sujeción de geometría fija en el rotor, b) sujeción de geometría fija en el anillo, c) sujeción de restricción deslizante sobre caras planas en la paleta, d) conjunto con restricciones de movimiento. Fuente: Autor del proyecto

La simulación se realizó sometiendo la paleta a la mayor fuerza que se genera en una revolución, para el caso del bronce fue de 268,34 N, Fig. 5.

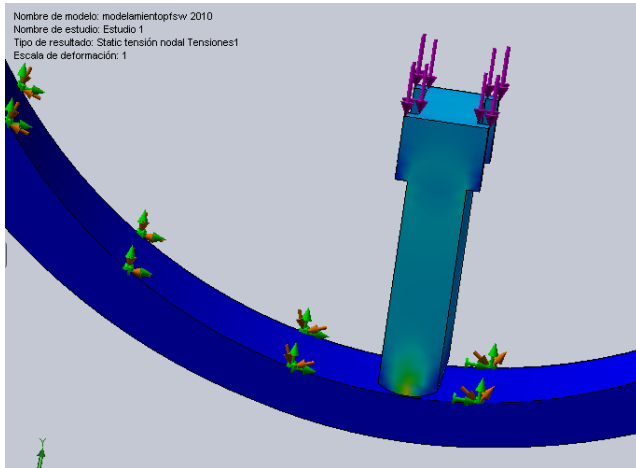


Fig 5: Contacto paleta bronce – anillo. Fuente: Autor del proyecto

En los resultados se observó puntos de concentración de esfuerzos máximos de 40,32 MPa Fig. 6, Las tensiones mostradas calculadas no sobrepasaron el límite elástico del bronce 102.3 MPa.

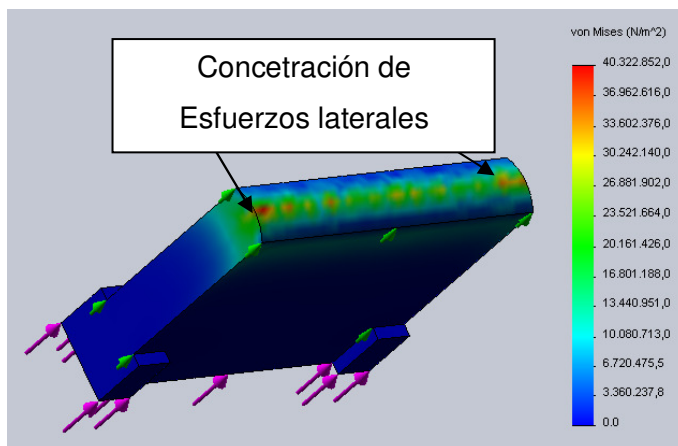


Fig. 6: Esfuerzos de von mises sobre la paleta de bronce. Fuente: Autor del proyecto

### III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La naturaleza intergranular de los múltiples vacíos encontrados y el tipo de carga que experimentan las paletas, llevan a concluir que el mecanismo predominante es el de desgaste generado por la concentración de esfuerzo e influenciados por los vacíos de plomo los cuales generan desprendimiento de material modificando el Sistema tribológico de la paleta y anillo.

El desgaste es lógico que se acentúen en la zona lateral

de las paletas, ya que allí hay un mayor valor de esfuerzos residuales, sin embargo, no por ello se puede achacar la causa raíz del problema a una posible concentración lateral de esfuerzos sobre las paletas, debido a que hay paletas que presenta falla sobre toda el área de contacto. Así pues, se concluye que la causa raíz del problema de desgaste acelerado, se debe a una deficiencia en el control de calidad siderúrgico de las paletas, que las dejó con vacíos intergranulares haciéndolas más susceptibles a la concentración de esfuerzos y por ende al desprendimiento de material sólido.

### IV. CONCLUSIONES

La causa raíz de la falla en las paletas de la bomba hidráulica se ubicó en el estado microestructural del material debido al tipo de proceso de fabricación. A la causa raíz se le contribuyó el hecho de encontrar vacíos intergranulares, que propician puntos concentradores de esfuerzos susceptibles a desprendimientos de material sólido, los cuales entran en contacto en el sistema tribológico, aumentando la rata de desgaste. A la empresa operadora de la bomba se le recomendó utilizar unas paletas fabricadas por un proceso de fundición por laminado y posterior mecanizado.

También se le recomendó evaluar el plan de mantenimiento predictivo, con el fin de garantizar el control de las tendencias de vibración y mantener el activo en una zona proactiva sobre el diagrama P-F.

### REFERENCIAS

- [1] L. Nelik, "Centrifugal and Rotatory pumps fundamentals with applications" CRC PRESS TJ919.N34 1999.
- [2] G. White Introducción al análisis de vibraciones AZIMA DLI, 1990-2010.
- [3] R. L. Eshleman "Vibraciones Basicas de Maquinas" Vibration Institute a not for profit corporation, Peru-Lima 2001
- [4] K. G. Budinski Guide to Friction, Wear, and Erosion Testing, ASTM Stock Number: MNL56, 2007
- [5] British Standar Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. ISO 10816 1995