

Durabilidad del par de fricción compuesto por el árbol de levas y el cuerpo de los cojinetes del motor VAZ de fabricación Rusa

Durability of the camshaft and its bearings in the Russian engine VAZ

Lázaro Antonio Daquinta Gradaille¹, Roberto Jorge Sánchez², Emilio Agosto Álvarez García³, Eloy García Aragón² y Hugo Ranero Morgado⁴

RESUMEN. El presente trabajo consiste en la investigación de la durabilidad de los elementos del par de fricción formado por el árbol de levas y su cojinete de apoyo en el motor VAZ de fabricación rusa, a partir de una tecnología de recuperación desarrollada en los talleres de la Empresa de Transporte en la provincia de Ciego de Ávila. La realización del trabajo permitió demostrar que la recuperación del cuerpo de los cojinetes con metal Babbitt B83, crea un par de fricción hierro fundido-metal Babbitt B83, el cual garantiza una menor velocidad de desgaste y un menor desgaste volumétrico con respecto al par original compuesto por hierro fundido-aluminio; con un costo de recuperación inferior al precio de las piezas nuevas.

Palabras clave: desgaste, durabilidad, tribología, reparación, árbol de levas.

ABSTRACT. This paper is on the investigation of the durability of the camshaft and its bearing in the Russian engine VAZ, according to the technology developed by the Transport Enterprise, Ciego de Avila. This research shows that the obtained bearings using Babbitt B83 originate a friction pair cast iron - Babbitt B83. This guarantees smaller wear speed and smaller volume wear by comparison with the original one composed by cast iron and aluminum. The recovery cost is lower than the price of the new pieces/components.

Keywords: wear, slow waste, durability, tribology, repair, camshaft

INTRODUCCIÓN

La recuperación de piezas, como parte de los procesos de mantenimientos correctivos y reparaciones complejas de máquinas, equipos e instalaciones industriales, reviste una gran importancia para alargar el plazo de vida útil de las piezas, aprovechando además su vida remanente que se pierde al convertirla en chatarra, permitiendo alcanzar resultados económicos positivos y preservando el medio ambiente.

En Cuba se trabaja intensamente en la implantación de diferentes métodos para la recuperación de piezas desgastadas que permitan disminuir el costo de la reparación general de las máquinas y de esta forma dar respuesta a las demandas de piezas de repuesto.

En los diferentes talleres de reparación del país se aplican algunos métodos de restauración de piezas desgastadas como es el recargue con soldadura eléctrica manual y mecanizada, los procesos de recubrimientos electrolíticos, los procesos de

Recibido 12/10/09, aprobado 22/09/10, trabajo56/10, revisión.

¹ Dr.C., Prof. Universidad de Ciego de Ávila "Máximo Gómez Báez", Ciego de Ávila, Cuba, E-✉: adaquinta@rect.unica.cu

² MSc. Prof. Universidad de Ciego de Ávila "Máximo Gómez Báez", Ciego de Ávila, Cuba.

³ Dr.C., Prof., Universidad Central de Las Villas "Martha Abreu", Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

⁴ Mecánico "A" Empresa de Transporte de Ciego de Ávila.

⁵ La mención de marcas comerciales de los equipos, instrumentos o materiales específicos obedece únicamente a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos por la dirección de la revista, la que tampoco se responsabiliza con los criterios emitidos con relación a productos de determinada firma comercial.

proyección térmica, entre otros. Los cuales presentan sus limitaciones, primero por su alto costo, y segundo porque en ocasiones se varía la estructura del metal base de la pieza objeto de la recuperación. Esto obliga a buscar otros métodos capaces de cumplir las exigencias técnicas requeridas sobre la base de mejorar las propiedades mecánicas de las piezas y buscar otras cualidades.

En los últimos años en Cuba la demanda potencial y real en la recuperación por recargues resistentes al desgaste de piezas tipo eje, en particular árboles, ha crecido progresivamente en volumen y en los momentos actuales, con el incremento actual y futuro, en la adquisición y explotación de gran cantidad de equipamiento Industrial y de miles de equipos automotrices que utilizan el motor de combustión interna como fuente de energía se producirá un incremento continuo en la demanda de la recuperación de árboles y otras piezas tipo eje, y por tanto, en igual proporciones crece y crecerá la demanda de materiales especiales para este fin.

El objetivo de este trabajo científico, es determinar la resistencia al desgaste que tiene la utilización del par de fricción hierro fundido-metal Babbit B83, formado en el proceso de reparación desarrollado por Hugo Ranero Morgado, mecánico

“A” de la empresa de talleres de transporte y su comparación con el par hierro fundido aluminio que se forma en las piezas originales del sistema de distribución de gases en el motor VAZ de fabricación Rusa, utilizado en el parque de vehículos automotores LADA.

DESARROLLO

El sistema de distribución de gases del motor VAZ de fabricación Rusa, está compuesto entre otras piezas, por el árbol de distribución o levas fabricado de hierro fundido y su cuerpo de alojamiento fundido en aluminio marca ML5 con dureza de 50HB con una resistencia a la rotura de 21 kg/mm² resultado de un tratamiento térmico de envejecimiento donde se eleva la temperatura de 140-160 °C durante 2 a 4 horas antes de la elaboración final para estabilizar la estructura. En los motores fabricados antes de 1982 se instalaron árboles de distribución colados con corriente de alta frecuencia y a partir de 1982 estos árboles de levas tienen un proceso de nitruración y se identifican por un faja hexaedra distinguible entre las levas 3 y 4. Las dimensiones nominales de estas piezas se indican en la Figura 1.

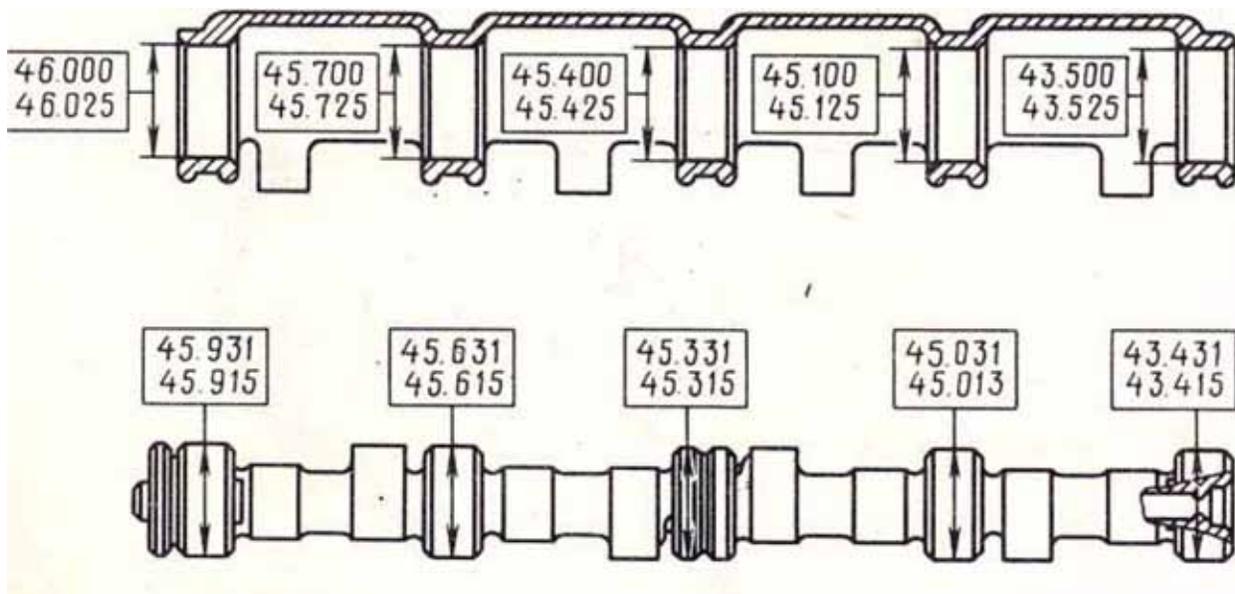


FIGURA 1. Dimensiones nominales en milímetros del árbol de levas y el cuerpo de alojamiento del motor VAZ de fabricación rusa.

En el árbol de levas, durante el funcionamiento del motor, actúan fuerzas que generan en él deformaciones de torsión y flexión, desgastes de las superficies de deslizamiento y hasta grietas que en casos extremos conducen a la rotura por fatiga según Daquinta (2008) y Manikov (1998). Las investigaciones realizadas y controles estadísticos en algunas plantas de reparación del país por un Colectivo de autores (1993), y por Daquinta (2008) confirman, que el desgaste de los muñones en los árboles de levas, constituye la causa ue determina, en más del 95% de los casos, su salida definitiva de explotación, al sobrepasar los límites de la última dimensión de reparación, momento en que ha perdido el espesor de la capa superficial o zona con las propiedades físico-mecánica acorde a las condiciones de trabajo.

Diferentes autores como Albarracín (2006); Álvarez (2002) y Linares (2005), coinciden en que el mecanismo de desgaste y su severidad entre dos superficies rozantes, depende esencialmente de la forma en que ocurren los contactos entre las superficies, características y/o propiedades físico-mecánicas, de los materiales del par tribológico; e interacciones entre las irregularidades y las partículas contaminantes que pueden intervenir entre dichas superficies, concepto estos, que se consideran de importancia para definir, junto con otros factores, las características y composición del sistema metalúrgico del par de fricción de una unión mecánica.

Los pares de deslizamiento muñón-cojinete en el árbol de levas, por sus características y durezas relativas entre ambos materiales, clasifican como un par duro-blando (liso rugoso) según Álvarez (2002); trabajan todo el tiempo bajo condiciones de lubricación hidrodinámica, favorecida por un efecto hidrostático, como describen Baranov (1999) y Jóvaj (1987 y 1977). Tales condiciones sufren cambios en el proceso de explotación con los cambios del régimen de trabajo del motor, dando lugar en diferentes momentos a otros regímenes de lubricación básicos como la lubricación parcialmente hidrodinámica o mixta y lubricación fronteriza o límite y con ello la modificación del coeficiente de fricción entre las superficies, aspectos abordados por Albarracín (1996 y 2006).

Trabajos técnicos e investigaciones han dado como resultado, que los muñones del árbol de levas de los motores VAZ, a pesar de las condiciones de trabajo severas, las magnitudes de los desgastes y su distribución son pequeñas, esto está determinado, en primer lugar, por ser un par duro-blando (liso-rugoso), donde el mayor desgaste ocurre en el elemento de menor dureza, o sea, el cuerpo de alojamiento del árbol de levas, en segundo lugar, por la propiedad de resistencia al desgaste superficial del material del árbol de levas dada en su composición química, dureza, estructura, etc., y en tercer lugar, y de gran importancia, por el cuidado y mantenimiento del régimen de lubricación; mecanismo de filtraje o limpieza del lubricante que hacen mínimo y muy ligero el efecto de abrasión en el par de fricción árbol de levas y sus cojinetes de alojamiento.

Los principales defectos del árbol de levas y su cuerpo de alojamiento pueden ser mecánicos y estructurales: los primeros son debido a la abrasión o desgaste excesivo por la presencia de partículas metálicas y suciedades, por las temperaturas elevadas, holguras incorrectas, desalineaciones, separación del metal antifricción del cuerpo de los cojinetes y deposición en los muñones de apoyo del árbol de levas por excesivo ajuste ocasionado por un árbol mal dimensionado que limita la entrada del lubricante en la unión; los segundos se deben a la fatiga por presiones y temperaturas excesivas, sobrecargas y corrosión por componentes ácidos en el lubricante, así como productos de la combustión (Balla *et al.*, 1989; Daquinta, 2008; Romero *et al.*, 1993). La holgura entre los muñones del árbol de distribución y los apoyos no deben sobrepasar los 0,2 mm.

Para la reparación del cuerpo de los cojinetes de alojamiento del motor VAZ, se utiliza un dispositivo diseñado y construido por Hugo Ranero Morgado, el cual se muestra en la Figura 2. Los orificios de apoyo donde gira el árbol de levas se amplían por encima de su medida original. Se confeccionan unos casquillos de acero CT-3 los cuales se estañan en su interior y se rellenan con metal antifricción B-83 de alta velocidad, ya que el árbol de levas puede trabajar hasta 2 800 min^{-1} en su velocidad máxima, posteriormente se maquinan en su interior a la medida del árbol de levas ya rectificado y se introducen a presión en los orificios del cuerpo de alojamiento del árbol de levas garantizando una holgura de 0,04 mm.



FIGURA 2. Dispositivo para la reparación del cuerpo del árbol de distribución de motor VAZ (Cortesía de Hugo Ranero).

Los árboles de levas con desgaste en los muñones de apoyo, se rectifican, obteniéndose un diámetro menor hasta una de las dimensiones de reparación, después de la rectificación los muñones se pulimentan con cinta abrasiva o pasta, y se ensamblan con un cuerpo recuperado con casquillos recubierto con metal Babbit B 83 mediante el proceso de escariado o mandrilado a una dimensión igual a la de los muñones rectificadas. Los apoyos del árbol de levas que sobrepasan las dimensiones de reparación pueden recuperarse mediante el cromado, acerado, recargue bajo fundente o la proyección térmica con polvos auto fundentes (Baranov, 1999; Colectivo de autores, 1993; Daquinta, 2008).

La composición química del B-83 que se utiliza en el proceso de recuperación del cuerpo de los cojinetes, es la siguiente: Antimonio (Sb): 10-12%, Cobre (Cu): 5,5-6,5%, Estaño (Sn) el resto de la composición, no posee contenido de Plomo (Pb): 0% y de Níquel (Ni): 0%. La estructura cristalina del

metal Babbit B 83 se muestra en la Figura 3.



FIGURA 3. Estructura cristalina del Babbit B 83.

Durante el desarrollo del presente trabajo de investigación se comparan dos pares de fricción, un par testigo (A) formado por el hierro fundido del árbol de levas y el aluminio del cuerpo de alojamiento del mismo y otro el experimental (B), formado

por el hierro fundido del árbol de levas con el metal Babbit B-83 utilizado en la recuperación del cuerpo de alojamiento, con el objetivo de determinar si el par de fricción logrado con la tecnología de reparación es mas durable que el par original.

Para determinar el tamaño de la muestra experimental (n) (número de réplicas), se asumió un grado de precisión medio del ensayo con un error relativo de un 4% ($2 < e_r \leq 5$) y un coeficiente de variación de un 2,16% para múltiples pruebas, seleccionando $n=3$ según la tabla 2.23 de la página 61, lo que demuestra que el rango de variación de los valores obtenidos en los experimentos resulta satisfactorio, por cuanto el valor del coeficiente de varianza calculado es menos que el tabulado o permisible (Álvarez, 2002; Shirakov, 1985).

Para lograr la precisión y confiabilidad necesaria en los resultados experimentales se seleccionaron tres árboles de levas testigos con dimensiones en los puntos de apoyo que garantizaban la holgura permisible con el cuerpo de alojamiento, así como tres árboles de levas experimentales y su cuerpo de alojamiento reparados por la tecnología objeto de evaluación.

A los árboles de leva experimental y testigo se le seccionó el primer muñón de apoyo, a los cuales se le eliminó todo tipo de impurezas (óxido, grasas, etcétera) con lija de agua de grano fino (600 Norton) y se le hizo un barreno en el centro de 16 mm que permite fijarlo en la máquina universal de fricción en revoluciones.

En la Figura 4 se observa una vista de la máquina de ensayo universal de fricción de revolución, construida y utilizada en los experimentos para caracterizar los pares tribológicos objetos de análisis. Esta máquina posibilita, el estudio de la fricción y el desgaste en pares tribológicos sometidos a fricción por deslizamiento, tanto para el estado de fricción seca como lubricada.



FIGURA 4. Máquina de fricción de revolución.

Los cuerpos de alojamiento testigo y recuperados con el casquillo recubierto con metal antifricción Babbit B 83, se marcaron formando ángulos de 45° y se seccionaron en 8 partes iguales, obteniendo unas zapatas que se barrenaron en la parte trasera para lograr fijarlas a una pieza que las sujeta a la máquina de fricción de revolución, logrando así que no giren junto con el muñón durante los ensayos experimentales. En la Figura 5 se pueden apreciar las probetas elaboradas del punto de apoyo del árbol de levas y de su cuerpo de alojamiento original (A), así como del árbol de levas reparado y los casquillos recubiertos con aleación Babbit B 83 (B).



FIGURA 5. Probetas del cuerpo de alojamiento original o testigo (A) y del casquillo experimental recubierto con aleación Babbit B 83 (B).

La magnitud de la fuerza de fricción es registrada por el captador inductivo (Figura 6A).

El motovariador de velocidad (Figura 6B) transmite el movimiento mediante el mecanismo de poleas y correas al muñón fijado en la bancada de la máquina, el cual, al friccionar con el cojinete tiende voltear la bancada móvil (Figura 6C). El sistema se mantiene en equilibrio debido a que el brazo de la bancada móvil (Figura 6D) contacta con el muelle plano, que se deforma producto de la magnitud de la fuerza de fricción.

El empleo de captadores para la determinación de la fuerza de fricción debido a la deformación de un elemento elástico permite simplificar de manera significativa el diseño y construcción de esta instalación experimental, la cual permite variar la velocidad de deslizamiento desde 0 hasta 15 m/s y las cargas desde 0 hasta 2 500 N.



FIGURA 6. Componentes de las maquina de fricción de revoluciones (de izquierda a derecha): A. Captador inductivo B. Motovariador de velocidad. C. Bancada móvil. D. Brazo de la bancada.

Para el ensayo experimental la velocidad de la máquina se determinó y fijó en 230 min^{-1} debido a que este par de fricción se simuló sin lubricación, en seco para acelerar el proceso y puede existir a altas velocidades de trabajo un calentamiento excesivo de estas uniones, pudiendo ocurrir atascamientos entre las piezas de la unión mecánica y alteración en los resultados experimentales.

La máquina de fricción en revoluciones se calibró a una presión nominal de contacto de 1 MPa, siendo el menor valor a aplicar a los elementos del par de fricción objeto de investigación, lo que se logró mediante un dispositivo calibrador construido para estos fines.

Durante el desarrollo de los experimentos se hicieron 24 observaciones en cada tratamiento, con una duración de 2 horas entre las observaciones, terminada una observación se espera 30 minutos para lograr que el par de fricción se enfríe a la temperatura del medio ambiente y luego se determinan los siguientes dimensiones: diámetro de muñón, ancho de la zapata, profundidad y ancho de la huella del desgaste mediante el uso de una bola de 8,43 mm de diámetro, tal como indica la Figura 7.



FIGURA 7. Determinación de los parámetros del desgaste.

Concluidas las observaciones según la norma ASTM G 77, se procesaron los datos experimentales con el uso de paquete estadístico (SPSS).plus 5.1 y se determinaron los siguientes parámetros de desgaste: Desgaste volumétrico (DV, mm^3), resistencia al desgaste (RD) y velocidad de desgaste (VD), los cuales se reflejan en la Tabla 1.

TABLA 1. Dimensiones experimentales medias y parámetros del desgaste obtenido en los pares de fricción testigo (A) y el par experimental (B)

TRATAMIENTO TESTIGO HIERRO FUNDIDO—ALUMINIO (A)								
	T Prom.	D Prom.	d Prom.	b(ancho de huella)	V(vol. huella)	DV	RD	VD
Inicio	19,62	45,58	0,00	17,32	31436,18	0,00	0,00	0,00
2 h	19,62	45,55	0,19	17,45	31310,99	125,19	0,008	0,02
4 h	19,62	45,53	0,39	17,60	31189,04	121,95	0,008	0,03
6 h	19,62	45,52	0,53	17,70	31105,50	83,55	0,012	0,04
8 h	19,62	45,51	0,67	17,80	31018,97	86,53	0,012	0,06
10 h	19,62	45,5	0,83	17,92	30918,46	100,51	0,010	0,07
12 h	19,62	45,48	1,00	18,04	30794,76	123,70	0,008	0,08

TRATAMIENTO EXPERIMENTAL HIERRO FUNDIDO—METAL BABBIT (B)

	T Pros.	D Prom.	d Prom.	b(ancho de huella)	V(vol. huella)	DV	RD	VD
Inicio	19,62	45,88	0,00	17,43	31851,35	0,00		
2 h	19,62	45,86	0,16	17,55	31752,93	98,43	0,010	0,01
4 h	19,62	45,85	0,26	17,62	31692,83	60,10	0,017	0,02
6 h	19,62	45,83	0,35	17,68	31622,17	70,65	0,014	0,03
8 h	19,62	45,82	0,42	17,73	31574,05	48,12	0,021	0,04
10 h	19,62	45,8	0,47	17,76	31521,46	52,59	0,019	0,04
12 h	19,62	45,79	0,66	17,90	31409,36	112,10	0,009	0,06

Los mecanismos de enlace de fricción en los pares tribológico objetos de investigación predeterminan el tipo de deterioro superficial y al mismo tiempo el mecanismo de desgaste predominante en ellos, o sea, el desgaste adhesivo que da la posibilidad de evaluar de manera concreta la capacidad de trabajo de los pares testigos y experimental; y obtener modelos de cálculos confiables que posibilitan determinar su durabilidad.

La dinámica del desgaste adhesivo de los pares de fricción se define por una serie de factores físicos y estructurales, los materiales que componen los pares testigos y experimental tiene diferentes estructuras, propiedades químicas y solubilidad, definiendo el desgaste las condiciones de lubricación, compatibilidad metalúrgica, microgeometría superficial y las condiciones de trabajo.

Los pares de fricción ensayados mostraron un desgaste adhesivo superficial, característico de pares metálicos con poca compatibilidad metalúrgica sometidos a altas velocidades de deslizamiento, grandes presiones de contacto y altas temperaturas superficiales, presentando rayas y surcos pocos profundos en dirección del movimiento.

En la Figura 8, el gráfico refleja el comportamiento del desgaste en el par experimental hierro fundido-metal Babbit B 83 y el par testigo hierro fundido aluminio durante un periodo de 12 horas, observándose que los valores de desgaste volumétrico y velocidad de desgaste del par de fricción obtenido mediante el proceso de recuperación del cuerpo de alojamiento del árbol de levas es menor.

El par de fricción hierro fundido-metal Babbit B83 garantiza una menor velocidad de desgaste y un menor desgaste volumétrico, o sea, posee mayor durabilidad que el par testigo, debido a que tiene un menor coeficiente de fricción que depende de las propiedades elásticas de material depositado, de su rugosidad superficial y de los parámetros que caracterizan la interacción molecular durante el contacto de la unión mecánica.

El comportamiento del desgaste en el par hierro fundido-aluminio (par testigo) durante las investigaciones se debe a que par está formado por materiales semicompatibles y con lubricación deficiente de ahí los valores elevados del desgaste adhesivo.

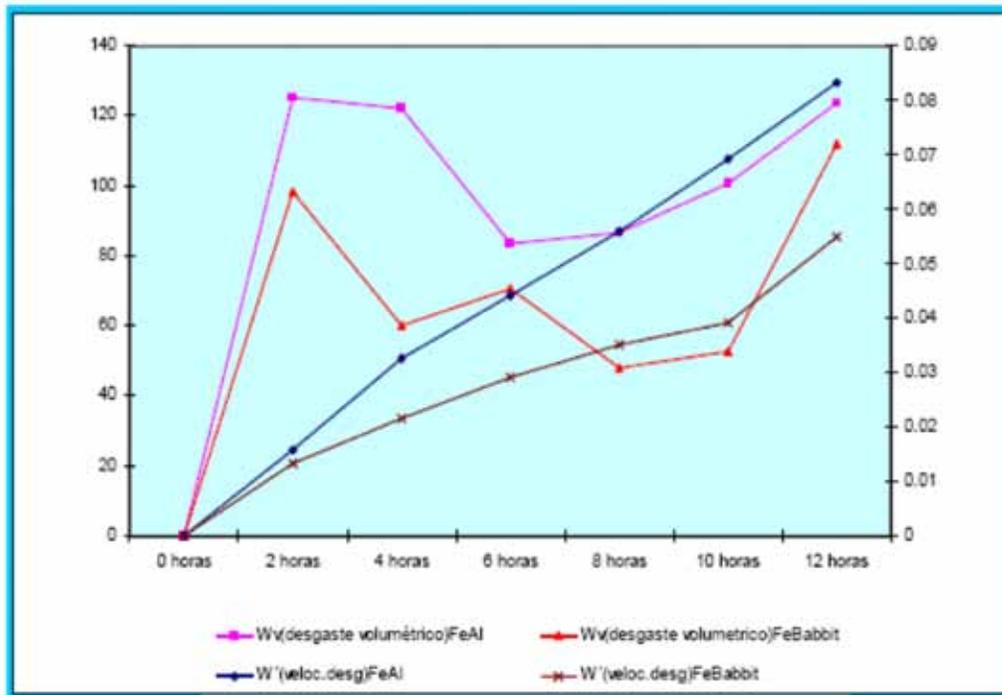


FIGURA 8. Gráfico comparativo del desgaste volumétrico y velocidad del desgaste de par de fricción experimental (B) y testigo (A).

CONCLUSIONES

- La tecnología de recuperación desarrollada por Hugo Ranero Morgado, permite la reutilización de un alto por ciento de árboles de levas que presentan desgaste en sus puntos de apoyo de hasta de 1 mm, sin necesidad del uso de la máquina alienadora.
- La selección del metal antifricción Babbit B83 como material de recargue del casquillo garantiza una composición química, estructura y dureza a la capa aportada que determina su resistencia al desgaste.
- El desgaste de las superficies de los muñones de apoyo del árbol de levas se desarrolla por la acción combinada del mecanismo de desgaste adhesivo y la incidencia de abrasión ligera, todo ello bajo cargas cíclicas variables en dirección y magnitud, y lubricación hidrostática.
- La utilización del par hierro fundido-metal Babbit B83 durante la recuperación del cuerpo de los cojinetes incrementa la durabilidad de la unión mecánica, demostrada por una velocidad y volumen de desgaste inferior que el par testigo, dado por un coeficiente fricción que depende de las propiedades elásticas del material depositado, de su rugosidad superficial y de los parámetros que caracterizan la interacción molecular durante el contacto de la unión mecánica.
- El costo de recuperación del cuerpo de los cojinetes es de \$ 207.88, inferior al precio de la pieza nueva que es \$1 930.08.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBARRACÍN, A. P: *Tribología y lubricación industrial y automotriz*, 976pp., Tomo I, 3ra. Edición. Colombia, 1996.
- ALBARRACÍN, A. P: *Impacto del desgaste sobre los mecanismos lubricados*, *Ingenieros de lubricación*, 4(4): mayo, 2006 [en línea] mayo 2006, Disponible en: www.ingenierosdelubricación.com [Consulta: junio 2009].
- ÁLVAREZ, G. E.: *Tribología, Fricción, Desgaste y Lubricación*, 253pp., Universidad Central de Las Villas (UCLV), monografía, 2002.
- BALLA, J.; D. JIZIK y M. MARKO: *Análisis de los desgastes de árboles, ejes y posibilidad de su recuperación*, (Zemedelska) Technika, Moscú, 1989.
- BARANOV, I. A: *Recuperación de los elementos de máquinas*, 2da Edición, Construcción de maquinaria, (en Ruso), Moscú, 1999.
- DAQUINTA, G. L.A.: *Libro "Mantenimiento y Reparación e la Máquina Agrícola"*,. Editorial Félix Varela, La Habana, 2008.
- JÓVAJ, M. S: *Motores de automóvil*, Editorial Mir, Moscú, 1987.
- JÓVAJ, M. S y S. MÁSLOV: *Motores de Automóvil*, Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1977.
- LINARES, O: *Tribología y mantenimiento proactivo, Fundamentos de la lubricación, fricción y el desgaste*. Boletín ASME, USA, 2005.
- MANIKOV, JV: *Reparación de Automóviles*, Segunda Edición Editorial. Construcción de maquinaria, (en Ruso), Moscú, 1998.
- Manual de recuperación de piezas*, Colectivo de autores, Editorial Científico Técnico, La Habana, 1993.
- ROMERO, V. R. y L.R. ZÚNICA: *Estadística*, Universidad Politécnica de Valencia, España, 1993.
- SHIRAKOV, V. P: *Diseño de experimentos*, pp. 392-394, Editorial Mir, Moscú, 1985.

*Todos nuestros servicios
a su disposición*

BIBLIOTECA ANTONIO MACHADO RUIZ

UNIVERSIDAD DE GRANMA (UGR)