

RESUMEN / ABSTRACT

El desgaste es uno de los daños más costosos para la industria y las investigaciones buscan entender los mecanismos del desgaste que podrían disminuirlo o evitarlo. Este trabajo analiza el comportamiento del aluminio obtenido por metalurgia de polvos cuando se somete a desgaste. Las muestras usadas fueron preparadas bajo diversas condiciones de proceso (presión de la compactación, la temperatura y tiempo de tratamiento térmico). Las pruebas de desgaste se realizaron en una máquina de pin-en-disco y fueron probados diferentes valores de velocidad y presión de desgaste. Los resultados obtenidos muestran el comportamiento tribológico del aluminio. Se presenta también un estudio comparativo entre una aleación de aluminio 356 y aluminio puro, demostrándose la viabilidad de lograr un comportamiento tribológico similar entre esta aleación convencional y el aluminio puro preparado por metalurgia de polvos.

Wear is one of the most costly damages in industry and research has been directed towards its prevention. This paper deals with the behavior of aluminum pieces, prepared by powder metallurgy, under wear. The samples tested were prepared under different processing conditions (compacting pressure, temperature and sintering time). The wear test was carried out in a pin-in-disc machine, at various rates and wear pressures. The results showed the tribological behavior of aluminum. Also, a comparative study between a 356-aluminium alloy and pure aluminum was carried out, showing the feasibility of attaining similar tribological behavior between a conventional alloy and pure aluminum prepared by powder metallurgy techniques.

Recibido: 23 de Septiembre de 2002

Aceptado: 25 de Junio de 2003

\* CFATA, UNAM, Campus Juriquilla, Querétaro, Qro., México.

\*\* Facultad de Química, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n. 36050, Guanajuato Gto. Correo electrónico: rosalf@mailbanamex.com

\*\*\* CIQI, Universidad de Guanajuato, Guanajuato Gto.

# Comportamiento Tribológico de Aluminio Sinterizado y Desgaste Bajo Distintas Condiciones.

Rosalba Fuentes Ramírez\*\*; Efraín Rubio Rosas\*; Veridiana Reyes Z.\*\*\* y Víctor Manuel Castaño Meneses\*.

## INTRODUCCIÓN

La superficie de los materiales es la región más sensible a las agresiones del entorno. El desgaste, la fatiga y la corrosión son los tres problemas que más ocasionan el reemplazo de máquinas y/o sus componentes. Sin embargo, el desgaste ha sido el menos estudiado y al que se le presta menos atención. Normalmente, el desgaste no ocasiona fallas violentas, pero trae como consecuencias la reducción de la eficiencia de operación, las pérdidas de potencia por fricción y el incremento del consumo de lubricantes.

El desgaste se define como el daño ocasionado a una superficie como resultado de un movimiento relativo entre dos superficies, las investigaciones actuales buscan comprender las causas y predecir sus consecuencias. Debido a este interés, ha surgido una ciencia denominada Tribología (del griego: tribos = frotar), la cual agrupa varias disciplinas involucradas en la interacción de superficies en contacto, con movimiento relativo y en presencia o ausencia de algún medio interpuesto.

La predicción del desgaste es difícil porque no es una propiedad intrínseca del material, sino que depende de todo el tribosistema con el que interacciona el cuerpo que se desgasta.

Czichos (1978), considera que en el desgaste pueden influir tanto variables operacionales como estructurales del sistema tribológico. Uno de los primeros intentos de correlacionar las variables que intervienen en el desgaste se debe a Archard (1953).

La investigación moderna ha establecido que hay cuatro formas de desgaste principales: abrasivo, adhesivo, corrosivo y fatiga superficial. La erosión y el movimiento micro-oscilatorio también se clasifican a menudo como formas de desgaste (Rabinowicz E.,

PALABRAS CLAVE: Aluminio; Tribología; Desgaste.

KEYWORDS: Aluminum; Tribology; Wear.

1995). En ciertas ocasiones pueden coexistir dos ó mas de estos tipos de desgaste al mismo tiempo.

El desgaste por abrasión que es el más común en industria, se define como la acción de corte de un material duro y agudo a través de la superficie de un material más suave. Tiende a formar ralladuras profundas cuando las partículas duras penetran en la superficie y ocasiona deformación plástica y/o arrancando virutas.

El desgaste adhesivo es la segunda forma de desgaste más común en la industria y ocurre cuando dos superficies sólidas se deslizan una sobre la otra bajo presión. Las proyecciones superficiales o asperezas se deforman plásticamente y finalmente llegan a soldarse debido a las altas presiones locales. Conforme continúa el deslizamiento, estas uniones se rompen produciendo cavidades en una superficie, proyecciones en la otra y también partículas abrasivas minúsculas, todo lo que contribuye a un mayor desgaste de las superficies. El aspecto de la superficie desgastada será de ralladuras irregulares y superficiales.

El desgaste corrosivo ocurre en una combinación de desgaste (abrasivo o adhesivo) y de un ambiente corrosivo. El índice de la pérdida material puede ser muy alto debido a que los productos sueltos o flojos de la corrosión, son quitados fácilmente por el desgaste y se descubre continuamente el metal fresco que alternadamente puede volverse a corroer rápidamente.

El desgaste por fatiga superficial es observado durante el deslizamiento repetido o por el rodamiento sobre una pista.

La erosión ocurre cuando las partículas transportadas por un medio fluido impactan sobre una superficie y arranca material.

El desgaste micro-oscilatorio se presenta cuando las superficies en contacto experimentan un desplazamiento tangencial oscilatorio de amplitud pequeña.

Se ha considerado que existen dos regímenes de desgaste claramente diferenciados que son: desgaste suave o moderado y desgaste severo. El primero se presenta si las cargas son ligeras y el segundo cuando las cargas son altas y el óxido protector es interrumpido continuamente, lo cual permite el contacto metálico íntimo así como la adherencia. Ambos términos generalmente se refieren al deslizamiento no lubricado.

El volumen desgastado durante el deslizamiento se define por:

$$V = C F_n d / D. \quad (1)$$

donde  $C$  es una constante de proporcionalidad,  $V$  es el volumen desgastado en una distancia deslizada  $d$ , por una superficie de dureza  $D$  (la menos dura de las dos superficies) y bajo una carga  $F_n$ .

$$\text{Archard (1953) mostró que } C = k / 3 \quad (2)$$

donde  $k$  es el coeficiente de desgaste y representa la probabilidad de que en un encuentro entre dos asperezas de las superficies en contacto, se produzca una partícula de desgaste y puede ser usado como una herramienta de predicción y de diagnóstico. Este coeficiente ha sido calculado y clasificado por Rabinowicz (1981), en base a la recopilación de una gran cantidad de resultados publicados por diversos autores en revistas especializadas. Bajo el enfoque propuesto por este investigador podría determinarse el tipo de desgaste, el mecanismo del proceso o la efectividad de la lubricación.

Coca (1992) afirma que las piezas sinterizadas de aluminio tienen algunas de las aplicaciones que el acero o materiales de cobre, pero con la ventaja de poseer un peso mucho menor, una mejor estabilidad ante la corrosión, mejor conductividad eléctrica y calorífica y no son magnéticas. El mismo autor dice textualmente "la resistencia al desgaste del aluminio es particularmente baja en el rozamiento en seco. No existe relación entre dureza y resistencia mecánica por un lado y resistencia a la abrasión por el otro".

El aluminio es el metal más versátil del mundo moderno y comercialmente puede encontrarse puro o aleado, en lingote o en polvos. Las piezas de aluminio obtenidas por metalurgia de polvos, denominada también pulvimetalurgia, pueden presentar como ventaja la eliminación de los problemas de segregación y la manufactura de formas complejas. Agregadas a estas ventajas, los materiales compuestos de matriz de aluminio poseen bajo peso, y resistencia a la corrosión. Las cualidades del aluminio son halladas también en los materiales compuestos de base aluminio. La resistencia al desgaste en estos materiales compuestos es una de las propiedades que se intenta desarrollar. Por lo tanto, este trabajo sobre el desgaste de aluminio puro obtenido por metalurgia de polvos, es importante, ya que podrá ser útil como referencia de comparación para materiales compuestos obtenidos por la misma técnica, y que se desarrollan actualmente y serán posteriormente reportados.

## MÉTODO EXPERIMENTAL

### Técnica de Compactación

La compactación del polvo de aluminio se obtiene con una prensa, que desarrolla una determinada presión en sentido perpendicular a la sección proyectada de la pieza a temperatura ambiente, esto le da al polvo una forma y consistencia que permite manipular la pieza.

Las probetas usadas en las pruebas de desgaste fueron hechas con polvo fino de aluminio de tamaño menor a 100 micras, proveniente de ALMEX S. A. de C. V. El polvo se compactó a temperatura ambiente en una prensa hidráulica T-40 automático Graseby, para ello primeramente se llenó por gravedad la cavidad del molde con el polvo de aluminio, luego se aplicó presión para obtener piezas cilíndricas de 2 centímetros de diámetro y 0.7 centímetros de altura. La distribución del tamaño de partícula que poseía el polvo de aluminio facilitó el llenado, ya que los huecos entre las partículas grandes se ocupan progresivamente por partículas más pequeñas.

### Tratamiento de Sinterización

Después de la compactación, las probetas se sinterizan. El sinterizado es un tratamiento térmico a una temperatura por debajo del punto de fusión del metal. Se aplica para provocar la aglomeración entre partículas (Ruíz Prieto J. M., *et al.*, 1999), dicha temperatura según Molera (1977), debe oscilar entre 2/3 y 4/5 de la temperatura de fusión. Constituye el último paso de fabricación del proceso de metalurgia de polvos y determina las propiedades finales del material. La fuerza principal que conduce a la sinterización es la disminución de la energía libre de las partículas. La sinterización de las piezas se realizó en una mufla Lindberg, modelo 51848 CTD.

### Pruebas de Desgaste

Las pruebas de desgaste se realizaron en un dispositivo de pin en disco, llamada también espiga sobre disco.

El pin, espiga o punta, es un cilindro de aluminio que es presionado bajo una carga sobre una superficie plana de un disco de acero en rotación.

Para realizar las pruebas de desgaste se utilizó una máquina pulidora Jean Wirtz TG-250 equipada con un odómetro para medir las rpm. Sobre su plato se fijó un disco de acero, al cual se le dio un tratamiento térmico para alcanzar 48 HRC en la escala de dureza Rockwell. Para completar el dispositivo de desgaste, se añadió a esta máquina, un porta-muestras para sujetar el pin, cambiarlo y además permitir que la carga se ejerza sobre el pin durante el deslizamiento. Las probetas se sometieron a ciclos de desgaste en el disco de acero, sin lubricación y por un periodo de dos horas. La pérdida de peso de la pieza debida al desgaste continuo fue medida a intervalos de 30 minutos. (figura 1).

Las pruebas de desgaste realizadas se agrupan de la siguiente manera:

- I. Pruebas de desgaste para conocer las mejores condiciones de manufactura.

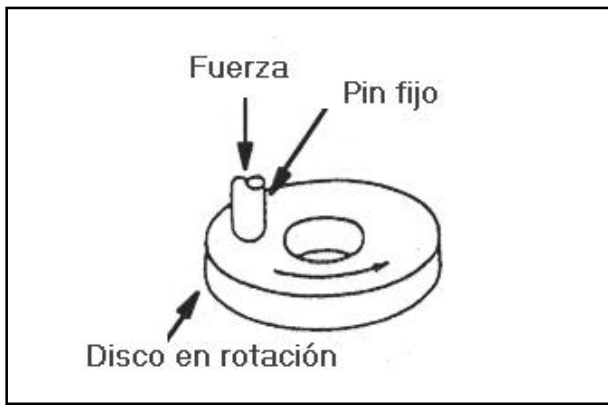


Figura 1. Esquema del dispositivo pin-en-disco.

- I.1. Variando la presión de compactación.
- I.2. Variando la temperatura de sinterización.
- I.3. Variando el tiempo de sinterización.
- II. Pruebas para conocer el comportamiento tribológico.
  - II.1 Variando la carga de desgaste.
  - II.2 Variando la velocidad del desgaste.
- III. Prueba para comparar el comportamiento tribológico del aluminio puro con una muestra de aluminio comercial.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

I. Pruebas de desgaste para conocer las mejores condiciones de manufactura.

I.1. Variando la presión de compactadas.

Parámetros de desgaste: carga 9 KN por un periodo de dos horas y 320 rpm.

Condiciones de manufactura: tres probetas compactadas a 175, 300 y 425 Mpa y sinterizadas a 610°C por tres horas en atmósfera de aire.

Los resultados de la prueba de desgaste con probetas compactadas a diferentes presiones se muestran en la figura 2. Aunque a menor presión de compactación hay mayor pérdida en peso, no existe una gran diferencia en el desgaste

que presentan las probetas con diferentes grados de compactación, además, esa diferencia es aun menor en 300 y 425 Mpa. Dado el comportamiento anterior y debido a que a altas presiones de compactación se complica extraer la probeta del molde, se escogió 175 Mpa como la presión de compactación en la manufactura de las probetas.

I.2. Variando la temperatura de sinterización.

Parámetros de desgaste: carga 9 KN por un período de dos horas y 320 rpm.

Condiciones de manufactura: tres probetas compactadas a 175 Mpa y sinterizadas a 320, 450 y 610°C respectivamente durante tres horas en atmósfera de aire.

Los resultados de la prueba de desgaste con probetas sinterizadas a diferentes temperaturas se muestran en la figura 3. Se observó que se presenta mayor pérdida de peso durante el desgaste de las probetas sinterizadas a una menor temperatura. Sin embargo, la diferencia en el desgaste entre la probeta es muy pequeña y aun menor entre las piezas sinterizadas a 450 y a 610°C. Aunque las probetas pueden sinterizarse a partir de 450°C, se decidió sinterizar las probetas a 610°C dado que da el mismo efecto y la difusión es mayor a dicha temperatura.

I.3. Variando el tiempo de sinterización.

Parámetros de desgaste: carga 9 KN por un periodo de dos horas y 320 rpm.

Condiciones de manufactura: tres probetas compactadas a 175 Mpa y sinterización a 450°C por media hora, 3 horas y 8 horas respectivamente, esto en atmósfera de aire.

En la figura 4 se muestran los resultados de la prueba de desgaste con probetas sinterizadas a diferentes tiempos. En esta prueba, no se observó una diferencia significativa en el comportamiento de desgaste de las probetas. Sin embargo, puede notarse que existe una mejor resistencia al desgaste para el sinterizado de tres horas.

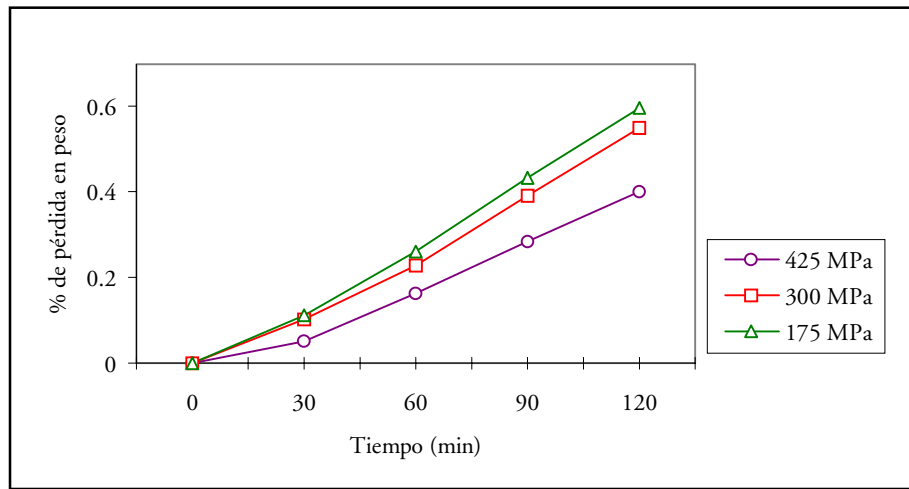


Figura 2. Comportamiento tribológico del aluminio compactado a diferentes presiones.

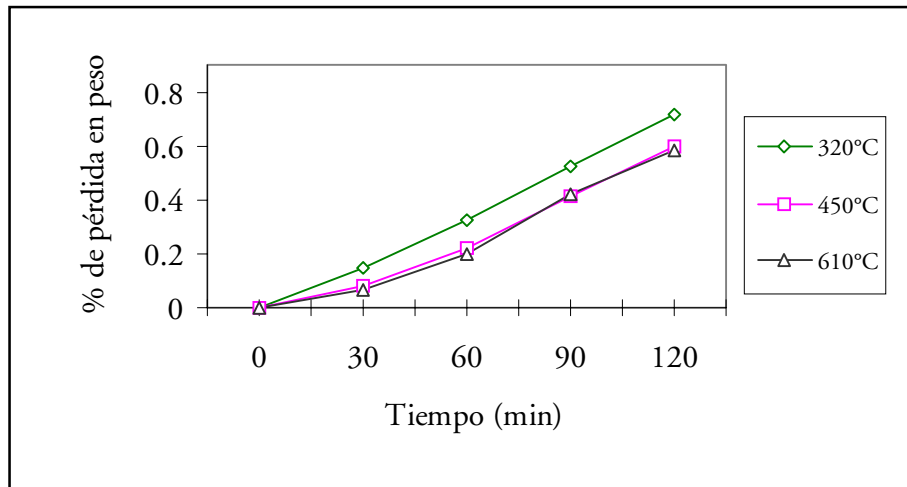


Figura 3. Comportamiento tribológico de aluminio sinterizado a diferentes temperaturas.

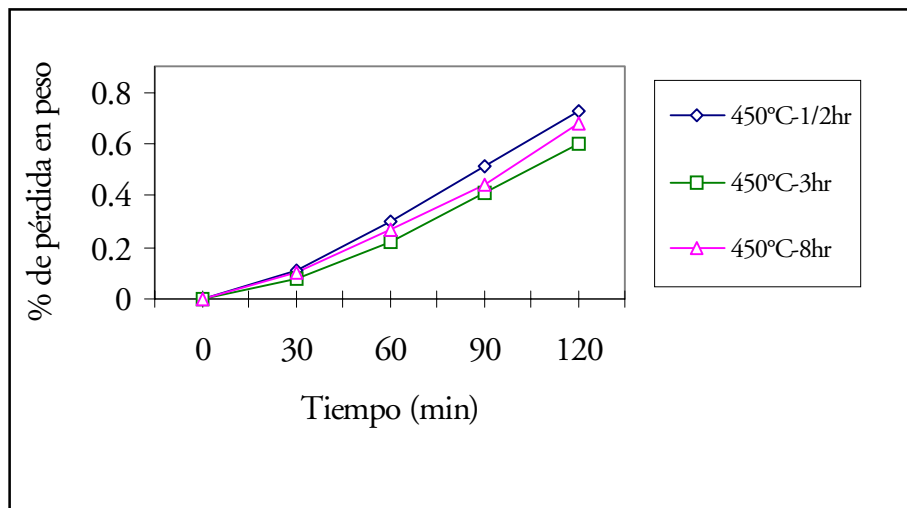


Figura 4. Comportamiento tribológico de aluminio sinterizado a diferentes tiempos.

II. Pruebas para conocer el comportamiento tribológico.

II.1. Variando la carga durante el desgaste.

Parámetros de desgaste: cargas 9 KN, 20 KN, 40 KN y 60 KN, por un periodo de dos horas y 320 rpm.

Condiciones de manufactura: probetas compactadas a 175 Mpa y sinterizadas a 610°C durante tres horas en atmósfera de aire.

En la Figura 5 se muestran los resultados de la prueba de desgaste, cuando se modifica la carga ejercida sobre el pin durante el desgaste. Las probetas utilizadas fueron compactadas y sinterizadas bajo las condiciones anteriormente seleccionadas. En esta figura se observó una pérdida en peso progresiva tanto a los 9 KN, como a 20 KN y a los 40 KN. Para estos valores de carga, la pendiente en las rectas del desgaste se mantiene constante a lo largo del tiempo transcurrido durante la prueba. En el caso de la carga de 60 KN, la recta presenta dos pendientes, esto indica la presencia de dos regímenes de desgaste, y la transición de desgaste moderado a severo se observa aproximadamente transcurridos 60 minutos. Es común que los materiales suaves, como es el caso del aluminio, muestren estas transiciones repentinas entre dos regímenes de desgaste. Fue también realizada una prueba a 80 KN, observándose que la pérdida en peso disminuyó, sin embargo, la pieza experimentó una deformación tan grave y progresiva que la prueba fue suspendida.

II.2. Variando la velocidad de desgaste.

Parámetros de desgaste: carga 9 KN por un período de dos horas aplicados a probetas sometidas a las siguientes velocidades de desgaste: 210, 320, 430, 540 y 750 rpm.

Condiciones de manufactura: cinco probetas compactadas a 175 Mpa y sinterizadas a 610°C durante tres horas en atmósfera de aire.

En la figura 6 se muestran los resultados de la prueba de desgaste, cuando se modifica la velocidad del disco contra el que es deslizado el

pin durante el desgaste. Las probetas utilizadas fueron compactadas y sinterizadas bajo las condiciones anteriormente seleccionadas. En esta figura, se observó menos pérdida en peso a 210 rpm que a 320 y que a 430 rpm, posteriormente al elevar la velocidad (540 y 750 rpm) la pérdida en peso vuelve a ser significativa. Aunque en general, el desgaste aumenta al incrementarse la velocidad de la prueba, se observó que éste, no es tan progresivo a partir de 430 rpm.

III. Prueba para comparar el comportamiento tribológico del aluminio puro con una muestra de aluminio comercial.

Parámetros de desgaste: carga 9 KN por un periodo de dos horas aplicados a probetas sometidas a una velocidad de desgaste de 320 rpm.

Condiciones de manufactura: probetas compactadas a 175 Mpa y sinterizadas a 610°C durante tres horas en atmósfera de aire.

La figura 7 muestra el comportamiento tribológico de aluminio puro conformado por metalurgia de polvos y de la aleación Al-356, la cual, es una aleación de aluminio manufacturada por el método de fundición y que contiene 7% de Si y 0.3 de Mg. El resultado de esta prueba muestra una pérdida en peso muy similar tanto para la pieza manufacturada por metalurgia de polvos como para la aleación comercial de aluminio.

## CONCLUSIONES

1. La metalurgia de polvos o pulvimetalurgia, ha resurgido como una de las técnicas más importantes de conformado de los materiales compuestos. Una gran variedad de piezas, conformadas con esta técnica, que utilizan al aluminio como metal base son comercializadas para diversas aplicaciones. Los resultados del análisis del comportamiento tribológico del aluminio puro conformado con la técnica de metalurgia de polvos son una información muy interesante, y además podrán ser utilizados como una referencia de comparación para nuevos ma-

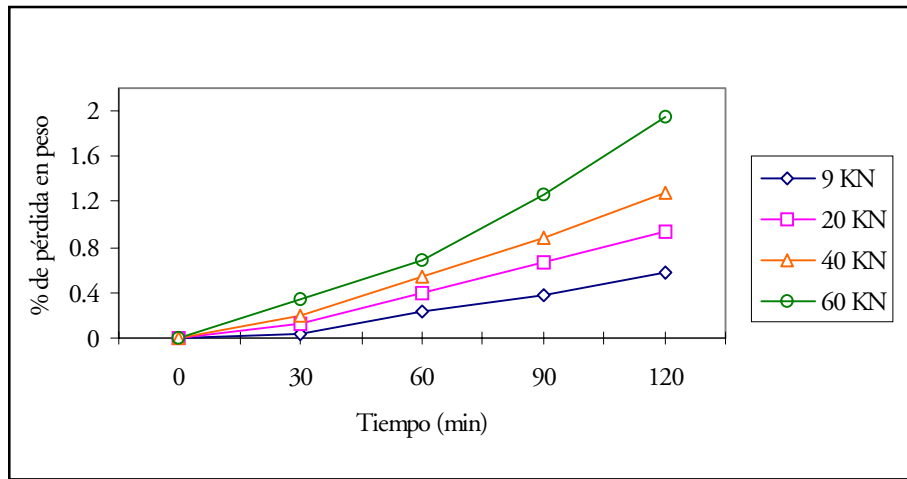


Figura 5. Comportamiento tribológico del aluminio a diferentes cargas de presión de desgaste.

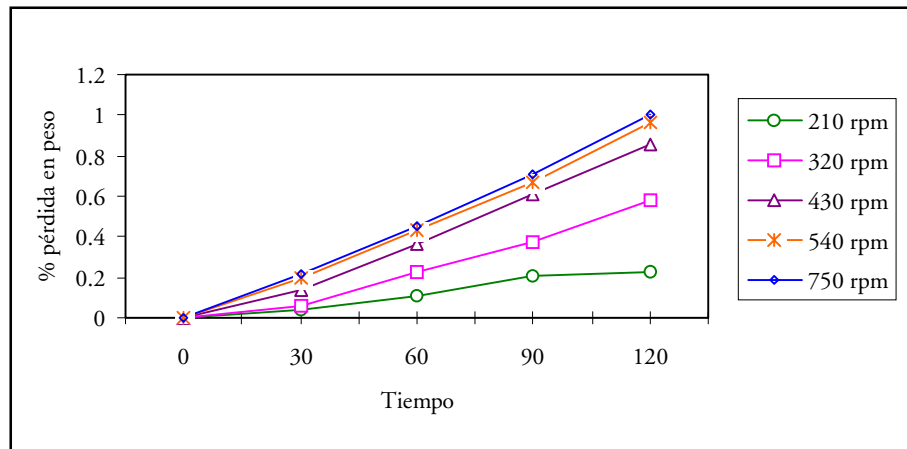


Figura 6. Comportamiento tribológico del aluminio a diferentes velocidades de desgaste.

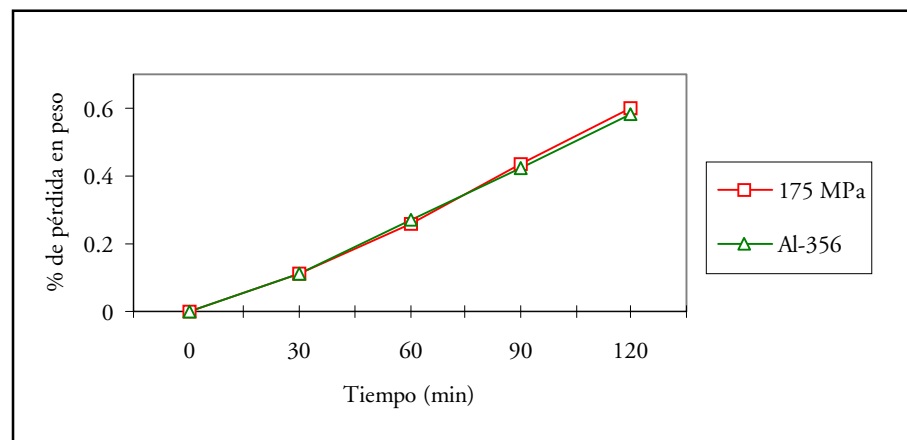


Figura 7. Comparación del comportamiento tribológico entre el aluminio puro y Al-356.

teriales compuestos de matriz de aluminio que se están desarrollando y serán próximamente reportados.

2. Utilizando la respuesta tribológica del aluminio, se encontró las condiciones de manufactura más adecuadas para piezas conformadas bajo la técnica de metalurgia de polvos. Dichas condiciones son:

2.1. Una presión de compactación de 175 Mpa, seleccionada porque la pieza está suficientemente compactada para manipularse sin deterioro, y por la facilidad para extraer la pieza del molde.

2.2. Sinterización 610°C y por un tiempo de 3 horas.

3. Bajo las anteriores condiciones de manufactura fue analizado el comportamiento tribológico del aluminio puro manufacturado con la técnica de metalurgia de polvos.

a) Se encontró que el desgaste es directamente proporcional a la carga ejercida durante el deslizamiento del pin contra el disco de acero hasta aproximadamente 40 KN. También que a 60 KN y a 60 minutos de empezada la prueba se observó la transición de desgaste severo a moderado para el aluminio puro obtenido por esta técnica.

b) El desgaste es progresivo hasta los 430 rpm, después ya no es tan notoria la pérdida en peso de la probeta.

4. Puede decirse que las propiedades tribológicas del aluminio puro fabricadas por pulvimetalurgia son muy similares a las de una aleación comercial de aluminio (Al-356). Esto muestra que la técnica de pulvimetalurgia tiene cualidades para ser competitiva en el área tribológica, una razón más de las muchas que existen, para apoyar el uso de esta técnica.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Técnico Marcos Ortega Yuriar por las facilidades prestadas para realizar la compactación de las probetas en el Laboratorio de Molienda del Centro de Geociencias, UNAM.

## REFERENCIAS

Archard J. F., (1953). Contact and Rubbing of Flat Surfaces, *Journal of Applied Physics* 24(8), 981-988.

Coca Pedro, (1992). *Manual del Aluminio*, 2da. Edición, Editorial Reverté S.A., Barcelona España.

Czichos H., (1978). A systems analysis data sheet for friction and wear tests and an outline for simulative testing, (5th meeting of IRG-OECD at CNRS, Paris, Abril 1976), *Source Book on Wear Control Technology*. Rigney, D.A. y Glaeser, W.A. (Editores), American Society for Metals, E.E.U.U.

Molera P., (1977). *Introducción a la Pulvimetalurgia*. Ediciones Bellaterra, S.A., Barcelona España.

Rabinowicz E., (1981). The wear coefficient - Magnitude, Scatter, Uses; *Journal of Lubrication Technology, Transactions of the ASME*, V. 103, N° 2, pp. 188-194.

Rabinowicz E., (1995). *Friction and Wear of Materials*. second edition, John Wiley & Sons, New York.

Ruíz Prieto J.M., García Cambroner L., Rorralba J.M. y Velasco F., (1999). *Manual de Pulvimetalurgia*. Editado bajo los auspicios de la Cátedra Höganäs de Pulvimetalurgia de la Universidad Carlos III de Madrid, Madrid España.