

## **Estudio del desgaste por deslizamiento en bronce**

### **Study of the sliding wear in bronzes**

*Carlos Holguín, John Coronado\**

Grupo de Investigación en Fatiga y Superficies. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad del Valle. Ciudad Universitaria Meléndez Calle 13 N.º 100-00. Cali, Colombia.

(Recibido el 25 de enero de 2007. Aceptado el 12 de abril de 2007)

#### **Resumen**

Se evaluaron tres bronce: SAE 67, nacional y americano usados típicamente como material de la chumacera en los molinos de caña de azúcar. Se realizaron pruebas desgaste por deslizamiento bajo la norma G77 usando bloques de bronce, anillos de acero SAE 1045 y aceite como lubricante. El tribómetro se calibró usando los anillos de acero SAE 4620 y se usó acero de herramienta SAE O1 para los bloques. Se realizaron metalografías, durezas y rugosidad de los materiales estudiados. El bronce nacional presentó menor coeficiente de fricción y el bronce SAE 67 presentó menor desgaste tanto en el bloque, como en el anillo.

----- *Palabras clave:* bronce, desgaste por deslizamiento, coeficiente de fricción.

#### **Abstract**

Three bronzes were evaluated: SAE 67, national and american typically used like bearing material in the sugar cane mills. Sliding wear tests were made under the G77 standard, using bronze blocks, SAE 1045 steel ring and oil like lubricant. The tribometer was calibrated using SAE 4620 steel ring and tool steel SAE O1 was used for the blocks. Microstructures, hardness and roughness of the studied materials were assessed. National bronze presented the least friction coefficient and SAE 67 presented the least block ring wear.

----- *Key words:* Bronze, sliding wear, friction coefficient.

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: +57 +2 + 321 21 33, fax: +57 +2 +333 48 99, correo electrónico: johnjairocoronado@yahoo.com (J. Coronado).

## Introducción

El 30% de la energía que se genera en el mundo se gasta para vencer los efectos de la fricción [1]. Una forma directa de disminuir el consumo de energía es reducir el coeficiente de fricción entre los elementos en contacto y la tribología es una de las ramas de ingeniería que permite evaluar el comportamiento a la fricción para el ahorro de energía e incrementar la durabilidad de los componentes de un sistema mecánico.

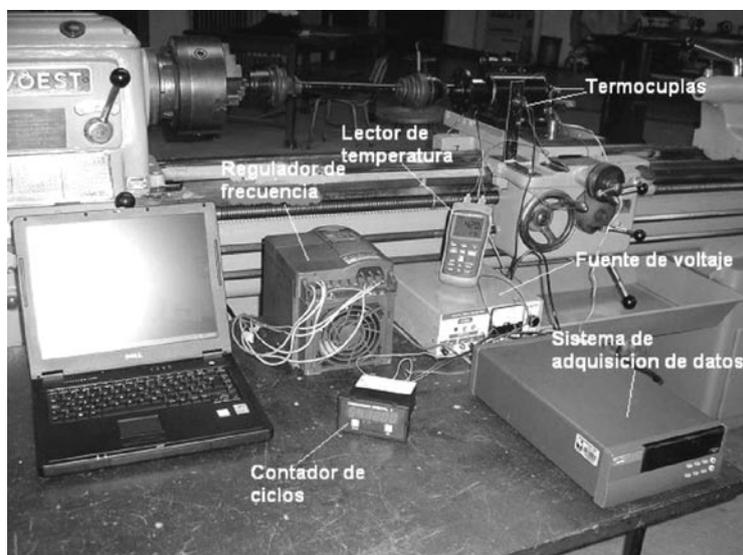
Un par de fricción está formado por dos materiales que presentan movimiento relativo entre sí y el material lubricante, el cual evita el contacto metal-metal. Debido a que las superficies son irregulares ocurren contactos localizados que aumentan las presiones, razón por la cual se presenta el desgaste de la superficie [2]. El coeficiente de fricción es uno de los parámetros más importantes que estudia la tribología porque permite evaluar las pérdidas de energía que se generan, tomar las acciones correctivas orientadas a mejorar la eficiencia y lubricación del sistema para aumentar la vida útil de los componentes del par tribológico. Entre las principales consecuencias de la fricción están: el desgaste, el calentamiento y la pérdida de energía y potencia.

En este trabajo se estudió el desgaste por deslizamiento del par o sistema tribológico bronce-acero, usado típicamente en el proceso de molienda de caña de azúcar. Se realizaron pruebas experimentales basadas en la norma ASTM G77 [3], que implica el uso de una configuración anillo-bloque, donde el anillo representa el eje del molino de caña y el bloque representa la chumacera o cojinete.

## Experimentación

### Equipo utilizado

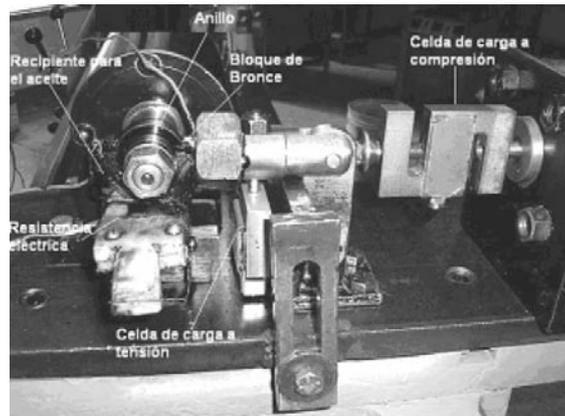
La figura 1 muestra los equipos usados para el funcionamiento adecuado del tribómetro: sistema de adquisición de datos, fuente de voltaje regulable, variador de frecuencia, termómetro digital, medidor de revoluciones y variador de temperatura. El termómetro digital registra la temperatura del bloque y el del lubricante. Para las conexiones de todos los equipos que van a la corriente eléctrica se utilizó un estabilizador de corriente que permite controlar los disturbios de energía eléctrica que entran al sistema.



**Figura 1** Equipos usados para la adquisición de datos del tribómetro

La figura 2 muestra el acercamiento del tribómetro de desgaste por deslizamiento, constituido por un anillo de acero y un bloque de bronce, los cuales están sumergidos en aceite. Las celdas de carga de tensión y compresión van conectadas al sistema de adquisición de datos y a la fuente de voltaje. El anillo rota, mientras que el bloque

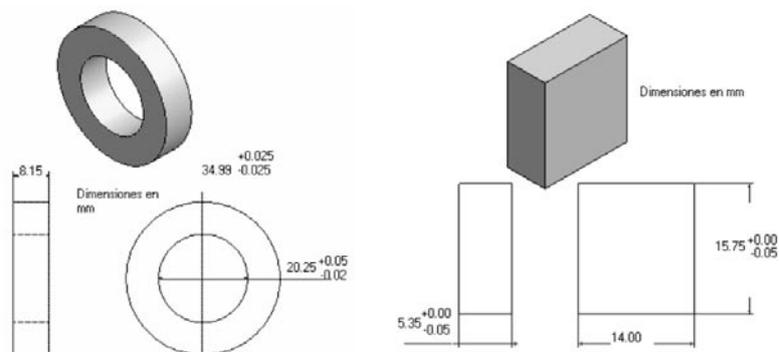
permanece fijo, produciéndose deslizamiento en el par que se encuentra sumergido en aceite. Las muestras se pesan en una balanza antes y después de las pruebas para medir la pérdida de masa y el coeficiente de fricción se calcula a partir de los datos almacenados por el sistema de adquisición.



**Figura 2** Tribómetro del desgaste por deslizamiento

En investigaciones anteriores [4-6] se encontró que el coeficiente de fricción entre bronce comerciales y acero SAE 1045 resultó ser menor para el aceite en comparación con la grasa, aunque la diferencia entre ellos no fue muy marcada, recomiendan utilizar aceite para estos pares tribológicos, además, con este lubricante se logró menor pérdida de masa de los materiales evaluados. Al evaluar el bronce SAE 67 y SAE 64 con aceite encontraron menor coeficiente de fricción para el bronce

SAE 67. Por tal motivo en este proyecto de investigación se estudiaron tres bronce usados habitualmente como materiales en la chumacera de los molinos de caña: bronce SAE 67, bronce nacional y bronce americano, se usó aceite como lubricante y acero SAE 1045 como material del anillo. Las dimensiones del bloque y anillo se muestran en la figura 3. En la tabla 1 se muestran las condiciones de operación del ensayo.



**Figura 3** Anillo y bloque de las pruebas de desgaste por deslizamiento

**Tabla 1** Parámetros de operación

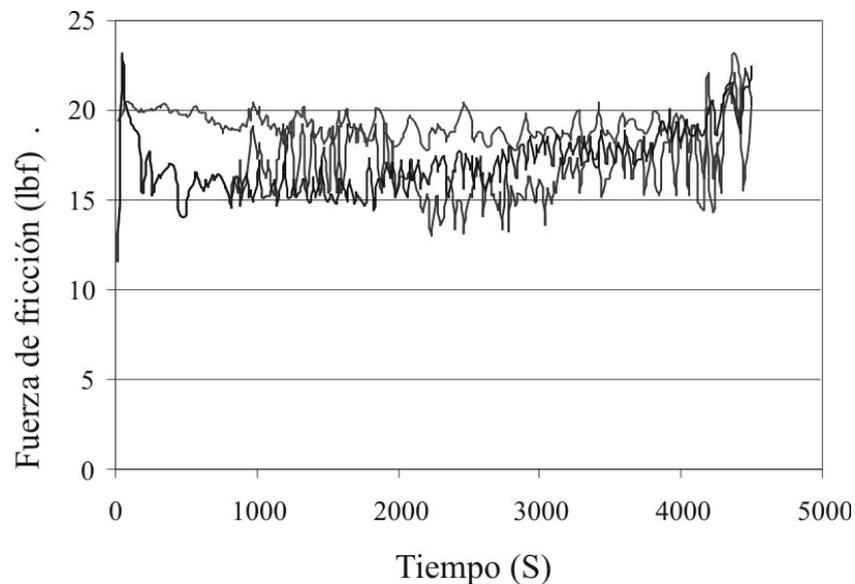
Velocidad de deslizamiento (m/s)	0,1265
Presión nominal (MPa)	8,1423
Distancia de prueba (rev)	5.400,0000
Temperatura de trabajo (°C)	51,0000

### **Calibración del tribómetro**

Se realizaron tres pruebas de calibración, el material usado para los anillos fue acero SAE 4620 y para los bloques se usó acero de herramienta SAE O1. El tribómetro estará en condiciones adecuadas cuando los resultados obtenidos de

la calibración se encuentren entre los siguientes límites: la medida de desgaste (ancho) entre 1,70 y 2,90 mm y la fuerza de fricción debe estar entre 66 y 97 N (15,0 y 22,0 lbf) [7].

En la figura 4 se observa la variación de la fuerza de fricción con respecto al tiempo, esta se mantiene en el rango recomendado por la norma (15,0 y 22,0 lbf), aunque en algunos picos están por fuera de estos valores. Para confirmar la adecuada calibración del tribómetro se midió el ancho de la entalla o huella en el bloque, el cual estuvo entre 1,50 y 2,60 mm, que se encuentran entre los límites indicados por la norma (1,70 a 2,90 mm), lo que confirma que el tribómetro está calibrado satisfactoriamente para realizar los ensayos.

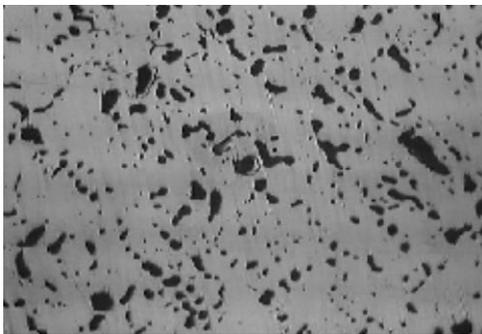
**Figura 4** Gráfica de fuerza de fricción con respecto al tiempo

### **Análisis metalográfico de las probetas**

Las metalografías se hicieron a los diferentes materiales que se usaron para las probetas. Los

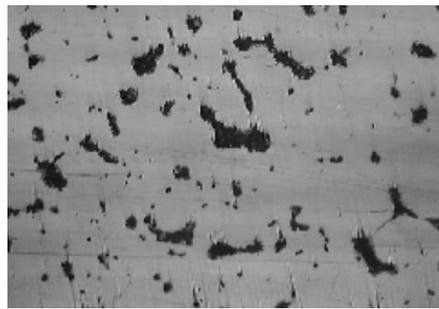
bronces no fueron atacados para observar con más claridad la dispersión de plomo que se encuentra en la matriz, mientras que el acero SAE 1045 fue atacado con nital al 2%. La metalografía

realizada al bronce SAE 67 (figura 5) indica que este tipo de bronce contiene plomo poco distribuido y formando pequeños aglomerados en la matriz, la cual consiste de una solución sólida de cobre y estaño. 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 coeficiente de fricción de los materiales en contacto.



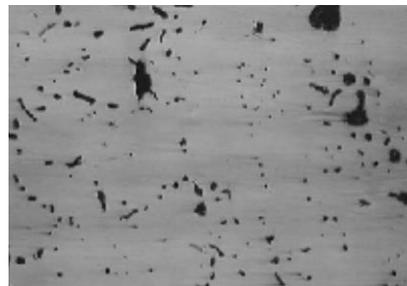
**Figura 5** Microestructura a 100X del bronce SAE 67

El bronce nacional se produce por fundición y se utiliza en aplicaciones de trabajo pesado. Tiene excelentes propiedades de maquinado, resistencia media y buena resistencia a la corrosión y a los ácidos suaves. En la figura 6 se observa que el bronce nacional presenta menos cantidad de plomo, pero los aglomerados de éste fueron más grandes que el bronce SAE 67.



**Figura 6** Microestructura a 100X del bronce nacional

En la figura 7 se observa la metalografía del bronce americano y se nota que tiene una menor cantidad de plomo que el bronce nacional y menor distribución de éste.



**Figura 7** Microestructura a 100X del bronce americano

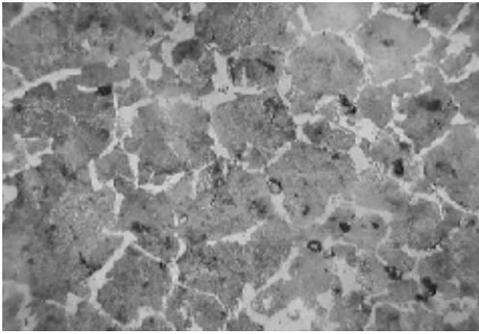
Los valores de dureza y rugosidades de los bloques de bronce evaluados se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2** Parámetros superficiales de los bloques de bronce

<i>Bloques de bronce</i>	<i>SAE 67</i>	<i>Americano</i>	<i>Nacional</i>
Rugosidad Ra (µm)	0,1286	0,1207	0,1301
Dureza (BHN)	54	55	51

La figura 8 muestra la microestructura del acero SAE 1045 usado para la construcción de los

anillos de acero, compuesto por granos de perlita rodeado por ferrita.



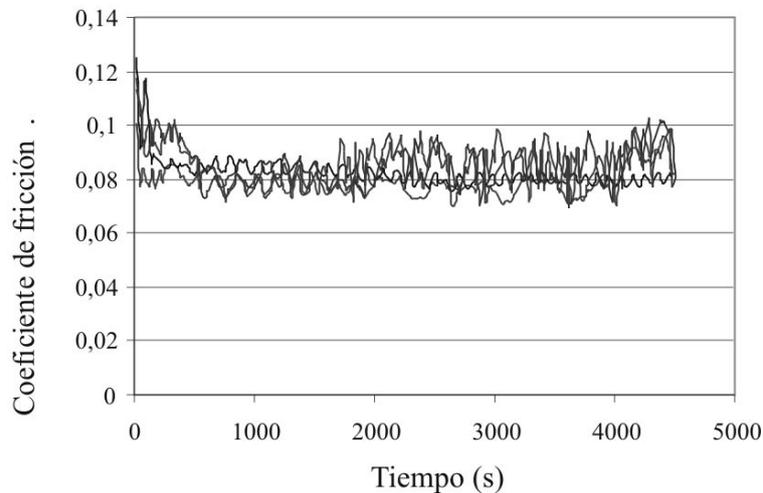
**Figura 8** Microestructura a 400X del acero SAE 1045

### Análisis de resultados

Las figuras 9-11 muestran la variación del coeficiente de fricción con respecto al tiempo para los bronce estudiados. Se aprecia que al empezar la

prueba, el coeficiente de fricción es mayor y se denomina coeficiente de fricción estático, donde se está presentando el periodo de asentamiento del par. De acuerdo con la norma ASTM G77, el coeficiente de fricción dinámico se calcula promediando los valores obtenidos entre 4.500 y 5.400 ciclos, que es el intervalo donde realmente se ha estabilizado la prueba.

En las gráficas donde el coeficiente de fricción varía bruscamente se presentó mayor vibración por causa de ruidos externos al sistema y posiblemente por excentricidades del anillo mayores a las más estables, por esto se debe tener especial cuidado en el maquinado de los anillos y bloques, tratando de que estos sean lo más concéntricos posible y que las caras del bloque queden paralelas.

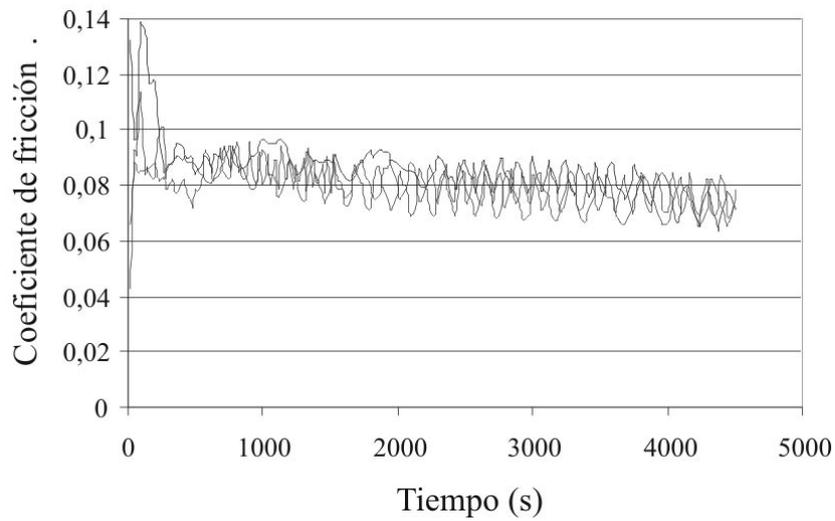


**Figura 9** Variación del coeficiente de fricción para bronce SAE 67

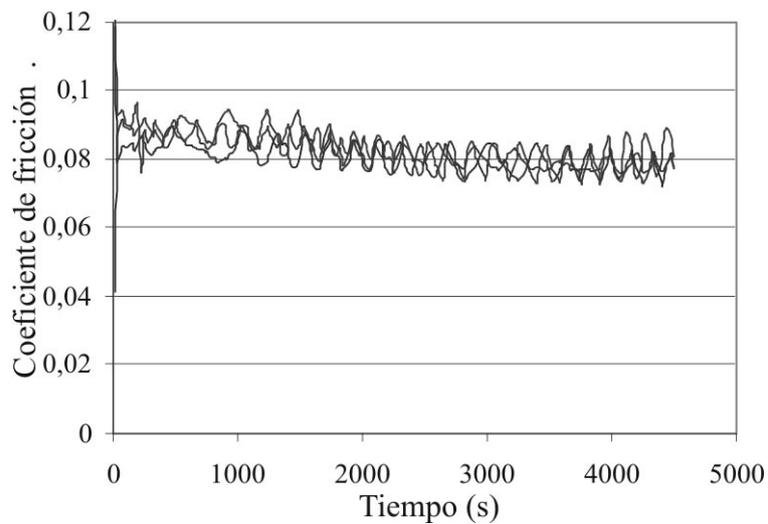
La tabla 3 presenta el coeficiente de fricción calculado para los pares tribológicos entre 4.500 y 5.400 ciclos, el cual no varió mucho entre los bronce estudiados. La tabla 3 también muestra los resultados de masa perdida en el bloque y masa perdida en el anillo para los diferentes bronce.

Las figuras 12-14 presentan gráficamente los resultados obtenidos para comparar los resultados entre los pares tribológicos evaluados.

El bronce nacional presentó menor coeficiente de fricción comparado con el bronce americano, esto ocurre por que este último contiene menor cantidad de plomo y peor distribución que el nacional. El coeficiente de fricción del bronce nacional fue menor que el bronce SAE 67, a pesar del menor contenido de plomo del bronce nacional, probablemente porque los aglomerados de plomo son de mayor tamaño.



**Figura 10** Variación del coeficiente de fricción para bronce nacional



**Figura 11** Variación del coeficiente de fricción para el bronce americano

**Tabla 3** Resultados de las pruebas

	<b><i>Bronce SAE 67</i></b>	<b><i>Bronce nacional</i></b>	<b><i>Bronce americano</i></b>
Coeficiente de fricción	0,08569	0,07554	0,08553
Masa perdida bloque (g)	0,00671	0,03237	0,01338
Masa perdida anillo (g)	0,00065	0,00190	0,00338

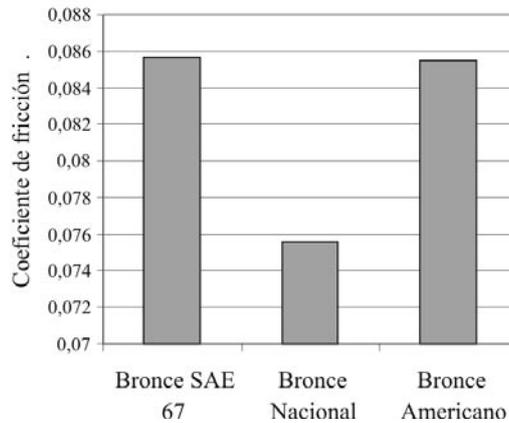


Figura 12 Comparación del coeficiente de fricción

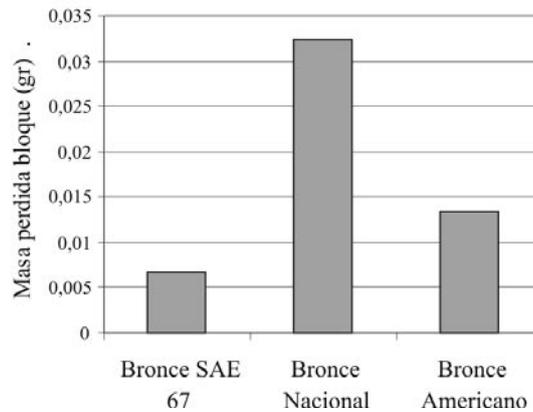


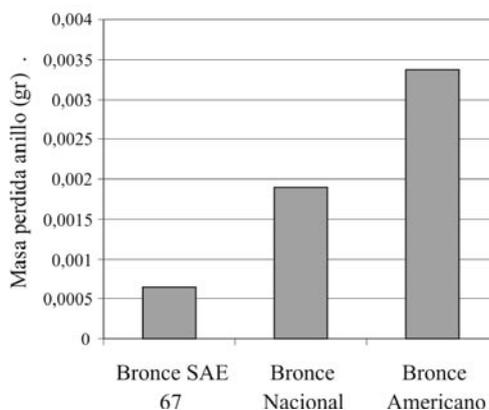
Figura 13 Comparación de la masa perdida en el bloque

El bloque de bronce nacional presentó mayor pérdida de masa que el bronce americano por ser el material más blando. El bronce SAE 67 presentó la menor pérdida de masa en el bloque para los pares analizados. Al comparar las figuras 12 y 13 se observa que el bronce nacional que presentó menor coeficiente de fricción, fue el de mayor pérdida de masa en el bloque. Mientras que los bronce SAE 67 y americano que presentaron mayor coeficiente de fricción y menor desgaste en el bloque. Al desprenderse partículas de plomo del bronce nacional probablemente por su mayor tamaño y menor sustentación, actúa como lubricante sólido entre el bloque y el anillo disminuyendo

el coeficiente de fricción, pero aumentando la pérdida de masa en el bloque.

La pérdida de masa de los anillos de acero SAE 1045 fue mayor cuando se evaluó usando bronce americano por ser este más duro que el nacional. El bronce SAE 67 fue el bloque que menor desgaste produjo en los anillos.

Entre el bronce SAE 67 y el bronce nacional con aceite como lubricante, el nacional presenta menor coeficiente de fricción, pero mayor pérdida de masa tanto para el bloque de bronce, como para el anillo de acero. Por razones de desgaste de los materiales es mejor usar bronce SAE 67 y por cuestiones de potencia (coeficiente de fricción) es mejor el bronce nacional.



**Figura 14** Comparación de la pérdida de masa del anillo

### Análisis estadístico

La tabla 4 presenta los resultados de desviación estándar del coeficiente de fricción, el coeficiente

de variación que cita la norma ASTM G77-91 y el porcentaje de error, que se presentó al realizar pruebas. Los porcentajes de error son pequeños, lo que indica que los resultados son confiables.

**Tabla 4** Coeficiente de variación

<i>Bronce</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Coeficiente de variación</i>	<i>% de error</i>
SAE 67	6,64341e-05	0,00077529	0,06795719
Nacional	0,000269395	0,003566061	0,31257904
Americano	0,000457322	0,005346098	0,46860612

### Conclusiones

Para obtener un menor coeficiente de fricción del par tribológico y generar más ahorro de potencia se debe usar un bronce con más contenido de plomo y que los aglomerados sean de mayor tamaño. La mejor opción desde el punto de vista de ahorro de energía resultó ser el bronce nacional, ya que presentó un menor coeficiente de fricción que el bronce americano y que el bronce SAE 67.

La mejor opción desde el punto de vista de desgaste (masa perdida) es el bronce SAE 67, pues

presentó menor desgaste en el bloque y produjo menor desgaste en el anillo de acero. El bronce americano produjo mayor desgaste en el anillo por su mayor dureza y menor contenido de plomo.

### Agradecimientos

El Grupo de Investigación en mejoramiento industrial con la colaboración del grupo de investigación en Fatiga y Superficies de la Escuela de Ingeniería Mecánica (Universidad del Valle), en el marco del “Proyecto Cooperativo Agroin-

dustrial para Reducir el Desgaste en Equipos de Preparación y Molienda” que se llevó a cabo en el Ingenio Manuelita S. A., con la participación de Cenicaña, agradece los aportes del personal de estas organizaciones y el apoyo financiero de Colciencias.

### Referencias

1. F. Pérez. *La tribología: ciencia y técnica para el mantenimiento*. Ed. Limusa. México D. F., 2002, pp. 9-23.
2. ASM Handbook. *Friction, lubrication and wear technology*. Ed?? Ciudad Vol. 18. 1992. pp. 25-37.
3. ASTM G 77. *Standard Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test*. Ed?? Ciudad 1998. pp. 1-14.
4. J. S. Rivas, J. J. Coronado, A. L. Gómez. “Tribological Aspects for the Shafts and Bearings of Sugar Cane Mills”. *Wear*. Vol. 261. 2006. pp. 779-784.
5. J. J. Coronado, J. S. Rivas, A. L. Gómez. “Estudio tribológico en chumaceras y ejes de molino de caña de azúcar”. *Dyna*. Vol. 144. 2004. pp. 1-8.
6. C. A. Holguín. *Caracterización tribológica del par bronce-acero AISI 1045 recubierto con soldaduras utilizadas en la recuperación de ejes de molienda*. Trabajo de grado. Universidad del Valle. Santiago de Cali. pp. 88-120.
7. ASTM D 2714. *Standard Test Method for Calibration and Operation of the Falex Block-on-Ring Friction and Wear Testing Machine*. 1998. pp. 1-4.