

**Fundición gris aleada con Al, Si y Mn para la fabricación de las chumaceras de los carros ferroviarios para el transporte de la caña**

**Cast iron alloyed with Al, Si and Mn, employed for the production of pillow block of rail cars for the transport of sugar cane**

**Luis Orlando Martín Carvajal<sup>1</sup>, Asdrúbal García Domínguez<sup>1</sup>, Lázaro Pino Rivero<sup>2</sup>, Alejandro Simón de la Rosa<sup>3</sup>**

**1. Universidad de Camagüey. Facultad de Electromecánica. Departamento de Ingeniería Mecánica. Circunvalación km 5 ½ Camagüey. e-mail: luis.martin@reduc.edu.cu**

**2. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Facultad de Química. e-mail: lazaropr@uclv.edu.cu**

**3. TECMA Enrique Villegas. MINAZ. Villa Clara**

**Resumen**

En el trabajo se muestra la obtención por inoculación en cuchara de un hierro gris fundido del sistema Al-Si-Mn, con un nivel de aleación entre 5,27-5,70 %, donde el aluminio está presente entre 1,97-2,97 %, el silicio entre 2,14-3,30 % y el manganeso entre 0,49-0,53 %, cuyas propiedades metalográficas y mecánicas coinciden con las establecidas con premisas para su uso en la fabricación de cojinetes planos para los carros ferroviarios de carga de caña de azúcar, pues se obtuvo la matriz predominantemente perlítica entre 85-90 %, con inclusiones de un grafito laminar recto, uniformemente distribuido, en una concentración entre 10-12% y tamaño entre 45 y 90  $\mu\text{m}$ . Una dureza que está en el rango de 269-285 HB y el desgaste volumétrico sufre una reducción en la muestra M1 de 8,6 veces respecto al par tribológico formado con el metal base. La sustitución del bronce por hierro fundido reduce los costos de producción de los cojinetes planos.

**Palabras clave:** Fundición gris antifriccional, proceso de grafitización, desgaste.

**Abstract**

In this paper is shown the obtaining by inoculation in ladle of gray cast iron using the system Al-Si-Mn, with an alloy level among 5,27-5,70 %, where the aluminum is between 1,97-2,97%, the silicon between 2,14-3,30 % and the manganese between 0,49-0,53 %, whose metallographic and mechanical properties coincide with the established ones for the use in the production of plane bearings for the rail road cars to carry sugar cane, because the matrix was obtained predominantly perlitic (85-90 %), with inclusions of a laminate straight graphite, in a concentration among 10-12 % and size between 45 and 90  $\mu\text{m}$ . A hardness that is in the range of 269-285 HB and the volumetric wear is 8,6 times less in the sample M1 than in the tribologic pair formed by the basic metal. The substitution of brass by cast iron reduces the costs of production of plane bearings.

**Key words:** Antifrictional cast iron, graphitization, wear.

## INTRODUCCION

La chumacera para los carros de ferrocarril, que son empleados en la transportación de la caña de azúcar, requiere de un material que no dañe durante la operación a los ejes con los que forma un par de fricción. Si se tiene en cuenta que estos carros son llenados con grandes cargas y las velocidades de los mismos son relativamente bajas (por debajo de 60 km/h), son las razones por las cuales se justifica el uso de cojinetes planos o chumaceras. Cada carro tiene cuatro ejes y cada eje dos chumaceras. Las bases de las mismas se han fabricado tradicionalmente de bronce (2,5 kg cada una) cubierto con una capa superficial de aleación antifriccional de Sn-Pb. La lubricación utilizada es de tipo mixta y por salpicadura. Como cada carro tiene ocho chumaceras se requiere un total de 20 kg de bronce.

En la figura 1, se muestra la chumacera o cojinete plano, donde los ejes tienen sus muñones encerrados en unas cajas denominadas cajas de grasa, las que tienen un orificio para que penetre el eje. En la parte interior que da hacia la rueda ajusta al eje un sello que impide que el lubricante salte hacia el exterior. En la parte exterior tiene una tapa que sirve para la verificación que ejecuta el personal de mantenimiento. La parte superior la cubre el cojinete plano ajustándose al eje mediante una cuña y fijándose su posición a la caja de grasa a través de dos escalones que posee el cojinete en su parte posterior, mientras la caja de grasa se sostiene al bastidor del vagón a través de dos tornillos de fijación. Además en la parte inferior del eje se coloca la estopa que es la encargada de retener el aceite y mantener la película del lubricante en el eje. El cojinete está formado por dos partes o zonas: la base y la capa de rodamiento, siendo esta última la que ajusta al eje.

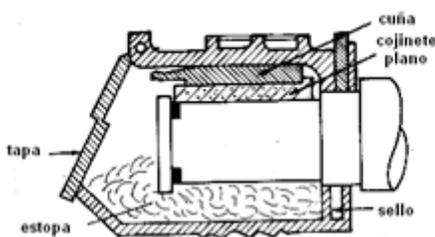


Figura 1. Sistema eje chumacera de los carros de transporte de caña por ferrocarril

La lubricación del sistema se produce por el contacto del eje con la estopa, produciéndose una película en la superficie de este que se genera como consecuencia del movimiento de rotación del par de ruedas durante la marcha. En dependencia del tiempo de estacionamiento del equipo la película de lubricante puede desaparecer lo que provoca que al reiniciarse la marcha la interacción o fricción entre el eje y el cojinete se produzca en seco. De ahí que se considera lubricación mixta.

Nacionalmente funcionan en la zafra azucarera un promedio de cinco mil carros de carga de este tipo para el transporte de la caña de azúcar, o sea se requiere un total de 100 t de bronce para satisfacer esta demanda. Sin embargo es conocido el alto precio de estas aleaciones en el mercado internacional, por lo que su sustitución por aleaciones más baratas es muy importante para la agroindustria azucarera cubana.

Teniendo en cuenta que la fundición gris es también un material antifriccional debido a la presencia del grafito libre dentro de su microestructura, entonces lograr una alta grafitización sin lugar a dudas debe contribuir a elevar sus propiedades tribológicas y convertirlo en una aleación elegible para las bases de estas chumaceras, donde no se emplean elevadas cargas, ni altas velocidades, como ya se ha mencionado.

En el mundo la tendencia de la producción del hierro fundido va en aumento con variantes como la inoculación de elementos aleantes en la cuchara, con el objetivo de aumentar sus propiedades y acercar la aleación a los requerimientos reales de las piezas.

En el trabajo se muestra cómo se puede influir sobre la grafitización de una fundición gris de bajo nivel de aleación, con matriz perlítica y con altas propiedades mecánicas y tribológicas a fin de elevar el contenido de grafito libre, disminuyendo con ello la dureza de la aleación base sin afectar significativamente la resistencia al desgaste, de modo tal que permita a esa aleación ser usada en aplicaciones donde actúe formando un par cinemático con otra pieza, de dureza relativamente baja, que por su importancia y costo no deba ser dañada durante el trabajo en condiciones ambientales severas, como es el caso del par chumacera eje en las ruedas de los coches que cargan la caña de azúcar hacia los centrales.

**2. Materiales y métodos**

Como se expresó anteriormente, en este estudio, se empleó el método de la inoculación en cuchara, tomándose como metal base la fundición gris que se usa en el taller Román Roca de Villa Clara en la fabricación de camisas para motores de combustión interna. Esta decisión está fundamentada en dos factores: las elevadas propiedades mecánicas de la aleación y el hecho de ser empleada normalmente en ese taller, ya que las camisas para los motores de combustión interna constituyen su rubro productivo fundamental. En la tabla 1 se refiere la composición química de la aleación base.

**Tabla 1.** Composición química de la aleación base expresada en (%)

C	Si	Mn	S (máx.)	P(máx.)	Cr	Ni	Mo	Cu
3,48	2,13	0,53	0,08	0,20	0,24	0,5	0,020	0,55

Lo primero que hay que observar en la selección del material son las exigencias de trabajo. Para el caso de las bases de las chumaceras hay que tener en cuenta que, ocasionalmente, la capa de aleación antifricción Sn-Pb puede entrar en contacto con el eje del carro ferroviario que es de acero 1045 normalizado produciéndose un desgaste elevado hasta que es detectado por el personal encargado de la revisión. En ese caso la chumacera debe ser retirada y sustituida por otra con los parámetros de trabajo normales. El eje no debe ser dañado por constituir el elemento más importante y caro del sistema. De allí que las condiciones o exigencias de trabajo para la base del cojinete sean: dureza inferior a la del eje (350 HB), buen comportamiento al desgaste y lograr esta combinación de propiedades sin elevar los costos en forma significativa. El bronce es blando pero su costo se ha elevado extraordinariamente por la presencia de materiales deficitarios en su composición, como el cobre y el estaño.

Para la sustitución del bronce de la base se ha decidido usar una fundición gris que es de por sí un material antifriccional debido a la presencia de grafito libre en su composición, el que actúa como lubricante sólido y que además se convierte en un reservorio de aceite durante el trabajo, pues el aceite se deposita en las cavidades que resultan cuando

las inclusiones de grafito son arrancadas de la superficie del metal. El material seleccionado como fundición gris base tiene elevadas propiedades mecánicas y tribológicas pero una dureza promedio relativamente alta y cercana a la del eje, lo cual no resulta aconsejable.

Teniendo en cuenta la influencia de factores tales como: composición química, las estructuras metalográficas, las propiedades mecánicas y tribológicas; se decidió alear el hierro fundido tomado como base, con los elementos del sistema aleante Al-Si-Mn.

De la composición de la aleación base se tomaron los límites inferiores de los elementos silicio y manganeso, presentes dentro del sistema aleante a estudiar. Para los límites superiores se tuvieron

en cuenta otras condiciones. En el caso del aluminio está condicionado por los efectos que se relacionan en (1), a partir de la relación concentración-efecto de este elemento. El límite superior del Si se estableció a partir de lo planteado en los estudios realizados por (2), referente a la influencia de este elemento sobre el proceso de grafitización. En relación con el manganeso el límite se tomó partiendo de los estudios realizados por (3) y (4), donde se plantea que un contenido de hasta un 1,5 % de Mn influye positivamente en las propiedades mecánicas de la fundición gris, pero después puede provocar daño en la estructura y propiedades de las fundiciones. Los límites, finalmente seleccionados, aparecen en la tabla 2.

**Tabla 2.** Niveles establecidos para los elementos a adicionar expresados en (%)

Límites	Al	Si	Mn
Inferior	1,0	2,0	0,5
Superior	3,0	4,0	2,5

En la planificación de la parte experimental se empleó el diseño propuesto por McLean, el cual se adapta de una forma bastante aproximada al sistema que se estudia. En los modelos asumidos en el presente trabajo y en los análisis correspondientes se tuvo en cuenta lo expuesto por (5).

Las variables independientes son los elementos de aleación del sistema:  $X_1$ : % Al,  $X_2$ : % Si y  $X_3$ : % Mn

Las variables de respuesta son:

$Y_1$ : Cantidad de grafito, %;  $Y_2$ : Microdureza de la matriz,  $HV_{25g\ 10s}$ ;  $Y_3$ : Macro dureza, HB;  $Y_4$ : Resistencia a la tracción, MPa

Para el procesamiento estadístico de los resultados se empleó el Stat Graphics Plus 4.1, obteniéndose doce puntos experimentales posibles, sin embargo de acuerdo a las restricciones impuestas solo son posibles cuatro puntos, a los que se le adiciona uno que representa la media de los niveles de cada elemento de aleación. El sistema que se emplea para desarrollar las aleaciones experimentales aparece relacionado en la tabla 3.

**Tabla 3.** Composición química de los cinco puntos experimentales

Elementos\Puntos	1	2	3	4	*
Aluminio, %	1,25	1,75	2,25	2,75	2,00
Silicio, %	3,00	3,00	2,00	2,00	2,50
Manganeso, %	1,00	0,50	1,00	0,50	0,75

Donde: \* es el punto experimental que muestra los valores medios de los elementos de aleación

### 3. Parte experimental

Para este trabajo se utilizó un horno de inducción de una capacidad de 2 t, con una frecuencia eléctrica de 500 Hz de la marca Fuji de fabricación japonesa. Para garantizar que la recuperación de los elementos fuera la más eficiente posible, en el momento de adicionarlo en la cuchara, se exigió el cumplimiento de los pasos propuestos en (6) con respecto a tamaño del ferrosilicio, ferromanganeso y aluminio puro; la temperatura de vertido desde el horno (1400-1500 °C); precalentamiento de las cucharas y la técnica para la incorporación de las adiciones de los materiales que contienen a los elementos aleantes al metal base en estado fundido, así como

se tuvo en cuenta también la agitación del caldo para la obtención de una buena solubilidad de los materiales adicionados.

El proceso decisivo que determina la estructura de la fundición y sus propiedades es la grafitización. En muchos casos la influencia de los elementos aleantes puede variar en los distintos rangos de temperatura y en dependencia de sus concentraciones. Por ejemplo en el caso del carbono, el silicio y el aluminio, aun cuando su contenido sea inferior al 4 %, presentan un efecto significativo sobre la formación del grafito en todas las zonas de temperatura tanto por encima de la transformación eutéctica, como durante dicha transformación; así como en la zona austenítica; durante la transformación eutectoide y por debajo de esta. Pero para el caso del níquel y el cobre, cuyos efectos resultan positivos sobre las propiedades mecánicas, su influencia no es igual durante la transformación eutectoide y por debajo de esta, al igual que el aluminio cuando sus concentraciones están en el rango de 4-10 % y resulta que no favorece entonces la formación de grafito libre. El cromo y el manganeso tienen un efecto antigrafitizante para todos los niveles de temperatura, pues son elementos que favorecen la solubilidad del carbono en el hierro.

Por esto, a la hora de analizar la influencia total de los elementos durante la transformación eutéctica, Guirshovich propuso en la ecuación (1) la constante de

grafitización durante la etapa eutéctica, que condiciona aproximadamente sus influencias relativas.

$$K'g=C [Si - 0,2 (Mn - 1,7S - 0,3) + 0,1 P + 0,4 Ni - 1,2 Cr + 0,5 Al + 0,2 Cu + 0,4 Ti - 0,4 Mo - \frac{2}{V} - \frac{8}{Mg}] \quad (1)$$

Del análisis de esta ecuación se observa que el papel grafitizante del carbono (elemento constituyente de la aleación binaria Fe-C) queda aumentado o disminuido en forma relativa por el resto de los elementos. Se observa la influencia decisiva del silicio, que junto al carbono tienen un efecto predominante.

El manganeso actúa en forma antigrafitizante al igual que el cromo, mientras que el níquel y el aluminio tienen un efecto positivo al igual que el cobre. De

ellos el papel del aluminio es el más destacado, pero dista de la influencia tan marcada que tiene el silicio. De allí el comportamiento diferente de las aleaciones experimentales en cuanto a la cantidad de inclusiones de grafito formado. Esto fundamenta la decisión tomada en el presente trabajo de usar una combinación de aluminio y silicio para aumentar la influencia del grafito presente en la aleación, sin aumentar considerablemente el silicio, para no afectar las propiedades mecánicas, principalmente la de resistencia de la aleación base.

Para la obtención de las probetas se usaron moldes de arena de acuerdo con las recomendaciones dadas por ISO Recommendation R-184. Los ensayos se realizaron según lo que establecen las normas (ISO Recommendation R-185), (ASTM A-536), (ISO 6506, 1981) y (ASTM E-10) las que corresponden para cada uno de los ensayos realizados.

En la realización de los análisis químicos se utilizó un analizador Spectrocast, que se basa en la espectroscopia de emisión atómica. Las muestras para realizar estos análisis se tomaron directamente de la cazuela en una coquilla o porta muestras enfriándose rápidamente, de modo tal que no se presente grafito en forma libre que afecta a la medición, las dimensiones de las pastillas obtenidas son de 10 mm de espesor y 30 mm de diámetro. En la caracterización metalográfica, se utilizó un microscopio metalográfico Neophot-32. La fabricación de las probetas se realizaron por maquinado a partir de las barras que se obtuvieron en los moldes de arena según las recomendaciones dada por (ISO Recommendation R-185).

La caracterización del grafito se realizó con un aumento de 100x y para ello se utilizaron las normas (ISO 945-75), la que concuerdan con la (ASTM A-536) y la Gost 3443-87. Para determinar la cantidad de grafito en una muestra se empleó el método planteado por Rack (1974). La matriz metálica se caracterizó atacando las muestras con Nital al 1 %, para revelar la base, el aumento que se utilizó fue de 500x. Las fotografías se tomaron con una cámara digital Epson Photo PC 550, empleando en el microscopio un aumento de 100x para estudiar la forma, distribución, tamaño y cantidad del grafito y de 500x para el estudio de la relación perlita-ferrita en la base metalográfica. En la determinación de la microdureza se empleó la norma (NC 04-11:72), para lo cual se utilizó un microdurómetro marca Shimadzo del tipo M, de fabricación japonesa.

Las propiedades mecánicas se midieron empleando probetas establecidas en los procedimientos relacionados en la norma (ISO 6506, 1981), la cual coincide con la (ASTM E-10). Para determinar la dureza Brinell (HB) se utilizó una bola de 10 mm de diámetro y una carga de 3000 kg. Los ensayos de tracción se realizaron de acuerdo con lo que se establece en la norma (ISO Recommendation R 185) para la elaboración de las probetas. Para estos ensayos se empleó una prensa universal modelo ZD-40, de fabricación alemana.

#### **4.Resultados y análisis de los resultados**

El proceso decisivo que determina la estructura de la fundición y sus propiedades es la grafitización, como bien se ha dicho anteriormente.

Al efectuar el análisis de regresión múltiple para comprobar el efecto de los elementos aleantes sobre la cantidad de grafito (Cg), en las aleaciones con los valores reales de composición química (tabla 4), se obtiene la ecuación de regresión (2) con un coeficiente de regresión de **R<sup>2</sup> = 99,6325 %**.

$$\text{Cantidad de grafito} = 1.8 * \text{aluminio} + 0.8 * \text{manganeso} + 2,8 * \text{silicio} \quad (2)$$

**(p = 0,0427)      (p = 0,3863)      (p = 0,0248)**

Donde se observa que la influencia de los elementos aleantes aluminio y silicio es significativa para un 99 % de confianza, y sólo para un 90 % en el caso del manganeso. Esto se explica debido al fuerte efecto grafitizante de los elementos señalados, en contraposición al manganeso que tiene un marcado efecto antigrafitizante. Podría entonces resultar contradictorio el signo positivo del coeficiente que afecta el contenido de manganeso, pero si se tiene en cuenta que este elemento en las cantidades adicionadas, tiene un efecto primario en la neutralización del contenido de azufre en las aleaciones y que el azufre tiene un efecto negativo en la formación de grafito, aun para cantidades muy pequeñas, este elemento resulta beneficioso para la grafitización en las cantidades adicionadas en el metal base.

Es importante destacar que en todas las aleaciones obtenidas experimentalmente, donde se elevó el contenido de aluminio, se alcanza una mayor cantidad de grafito, debido al efecto de refuerzo que en este sentido ejerce junto al silicio, en

comparación con la aleación base donde no existe presencia de aluminio, coincidiendo con lo expuesto en (7).

**Tabla 4.** Resultados de la caracterización metalográfica y ensayos mecánicos de las aleaciones estudiadas

Muestras	Al (%)	Si (%)	Mn (%)	Tg (µm)	Cg (%)	CF (%)	CP (%)	Dureza (HB)	RT (MPa)
M1	1,32	3,00	1,07	45	12	25	75	285,0	191,1
M2	1,97	3,30	0,49	90	12	15	85	285,0	222,9
M3	2,40	2,14	1,09	90	10	10	90	285,0	117,4
M4	2,97	2,14	0,53	45	12	10	90	269,0	140,1
CT	1,86	2,60	0,81	90	11	45	65	285,0	111,5
MB	-	2,14	0,53	90	6-8	5	95	320	300

Los términos de la tabla anterior significan:

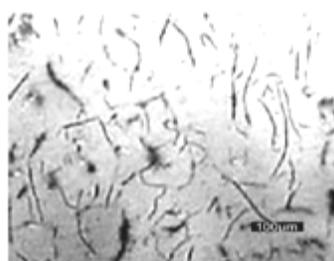
Tg es el tamaño del grafito expresado en µm; Cg es la cantidad de grafito expresada en % ;

CF es la cantidad de ferrita expresada en % ; RT es la resistencia a la tracción expresada en MPa; CT es el punto experimental formado por la media de los extremos de las variables de composición química; MB metal base sobre el que se efectuó la aleación en la cuchara para obtener el resto de los puntos experimentales.

En las figuras 2 y 3, las que corresponden a las muestras M3 y M4, respectivamente, se puede observar la concentración y distribución del grafito que se obtuvo siendo en estas dos muestras donde los niveles de aleación del Al y del Si se comportan de forma similares. La cantidad de grafito es un factor importante para disminuir el desgaste adhesivo ya que se comporta como lubricante, además luego de que el mismo se desprende de la matriz deja una cavidad que se convierte en reservorio de lubricante adicional, favoreciendo su papel para disminuir el coeficiente de fricción y con ello el desgaste adhesivo.



**Fig. 2. caracterización el grafito (M3) (M4)**



**Fig. 3. Caracterización del grafito**

Al efectuar el análisis de regresión múltiple para evaluar la influencia de los elementos aleantes sobre el tamaño del grafito (Tg), se tomaron como variables independientes los valores reales de composición química y como variable dependiente el tamaño de grafito (tabla 4) y se obtuvo la ecuación de regresión (3), con un R<sup>2</sup> de 99,2563 %.

$$\text{Tamaño del grafito} = -2,5909 * \text{aluminio} - 25,0909 * \text{manganeso} + 34,9091 * \text{silicio} \quad (3)$$

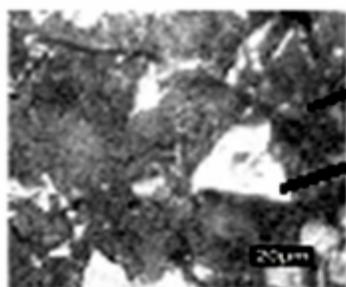
$$(p = 0,4637)$$

$$(p = 0,0442)$$

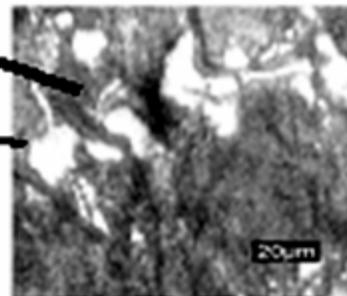
$$(p = 0,00092)$$

Donde se observa que el silicio se comportó como la variable más significativa con un 99 % de confianza y una influencia positiva sobre el crecimiento del grafito (tamaño de grafito), en tanto el aluminio y el manganeso son también significativas (90 % de confianza) y una influencia negativa, con una tendencia más marcada por este último, todo lo cual está en concordancia con lo expresado en la literatura respecto al efecto que tienen los elementos de aleación durante el proceso de grafitización.

Al caracterizar la matriz a través de las microfotografías tomadas, se observa que los resultados se correspondieron con lo esperado. En la matriz prevalece el contenido de perlita, se observa mayor proporción de esta fase en las muestras correspondientes a las aleaciones M2, M3 y M4 (tabla 4). En las figuras 4 y 5 se muestran las microfotografías de las matrices de las muestras M3 y M4, respectivamente.



**Fig. 4. Caracterización de la matriz (M3)**



**Fig. 5. Caracterización de la matriz (M4)**

A través del análisis de regresión múltiple se obtiene la ecuación de regresión (4), con la cual se puede evaluar la influencia de los elementos aleantes sobre la cantidad de perlita (CP). Esta ecuación muestra un coeficiente de regresión de  $R^2 = 99,7461\%$ .

$$\text{Cantidad de perlita} = 9,8182 * \text{aluminio} + 41,8182 * \text{manganeso} + 19,8182 * \text{silicio} \quad (4)$$

$(p = 0,0530)$        $(p = 0,0498)$        $(p = 0,0188)$

El silicio resulta la variable más significativa, mientras que el aluminio y el manganeso son significativos para un 95 %. Al tener en cuenta la magnitud de los coeficientes de regresión se observa que todos tienen un efecto positivo sobre la cantidad de perlita, aunque el mayor coeficiente corresponde al manganeso, lo cual significa que con un contenido inferior de este elemento respecto al resto, se obtiene mayor cantidad de perlita en las muestras, todo lo cual está en concordancia con lo que expresa la literatura respecto a este elemento, que tiende a favorecer la transformación de la austenita en perlita.

Para la realización de la evaluación tribológica de las muestras, se tomó como indicador al desgaste volumétrico ( $\text{cm}^3$ ), para ello se empleó un tribómetro del Laboratorio de Tribología de la Universidad de Oriente. Los parámetros utilizados se expresan a continuación: velocidad (90 rpm), tiempo (60 min) y esfuerzo (6,42 MPa), estos valores se asumieron de acuerdo a los regímenes de trabajo establecidos para pares cinemáticos del tipo pin-disco, realizándose tres réplicas para cada punto del diseño. En la tabla 5 se muestran los resultados para las muestras M1, M4 y MB, pues fueron aquellas cuyo comportamiento metalográfico se consideró más adecuado para las condiciones de dureza y resistencia impuestas previamente y se tuvo en cuenta que fueran las de mayor contenido de grafito libre.

**Tabla 5.** Desgaste volumétrico expresado en cm<sup>3</sup>

Réplicas	1	2	3	4	Media
Muestra M1	0,00050	0,00053	0,00054	0,00060	0,00054
Muestra M4	0,00030	0,00032	0,00034	0,00030	0,00032
Muestra MB	0,00269	0,00279	0,00300	0,00269	0,00276

De acuerdo a los resultados integrales de la caracterización realizada a las muestras, se observa que la adición de aluminio, en cantidades cercanas al 3 %, manteniendo una relación con el silicio, de forma de que este se encuentre en parámetros normalmente establecidos para las fundiciones grises (aprox. 2 %) y manteniendo el manganeso en los límites normales (hasta 0,5 %); se obtienen las características mecánicas exigidas para la aleación base, para el par tribológico estudiado, pero con una dureza que permita una interacción con un eje de acero AISI 1045 normalizado y de dureza promedio de 350 HB y lograr al mismo tiempo un mejor comportamiento al desgaste, incluso superior al del material base, como se puede observar en los resultados de la tabla 5 donde se aprecia una reducción en 8,6 veces del desgaste volumétrico en la muestra M4. Esto facilitará la aplicación deseada, o sea para bases de cojinetes planos (chumaceras) de carros ferroviarios para la carga de caña de azúcar, sustituyendo al bronce en este tipo de par tribológico, con una reducción significativa en el costo, ya que el bronce tiene un precio que oscila alrededor de los tres mil dólares la tonelada, o sea, cerca de tres veces más que el de la fundición gris.

### 5. Conclusiones

1. Se obtuvo mediante adición en la cuchara, un hierro fundido del sistema Al-Si-Mn, con un nivel de aleación entre 5,27-5,70 %.
2. Se obtuvo la matriz predominantemente perlítica entre 85-90 %, con inclusiones de un grafito laminar recto, uniformemente distribuido, en una concentración entre 10-12 % y tamaño entre 45 y 90 μm.
3. Esta estructura metalográfica confiere propiedades tales como: una dureza que está en el rango de 269 – 285 HB y una resistencia a la tracción entre 117-222 MPa.

4. El desgaste volumétrico confirmó la calidad de la aleación propuesta ya que incluso teniendo menor dureza que la aleación base, se obtiene una reducción del desgaste en la muestra M4 de 8,6 veces.

### 6. Referencias bibliográficas

1. Guirchovich. N. G.: *Manual del hierro fundido*, Mashinoostroenie, Leningrado, URSS, 1988.
2. Krause, D.E.: *Gray Iron – A Unique Engineering Material. Grey, Ductile and Malleable Iron Castings-Current Capabilities*. ASTM SPT 455, Philadelphia 1669, pp.3-28, 2002.
3. Anderson, J.C.; K.D. Leaver; R.D. Rawlings and J.M. Alexander: “*Ciencia de los Materiales*” 4<sup>ta</sup> ed., Chapman & Hall, London, 1990; Trad. Limusa Noriega Editores (1998).
4. Askeland, D.: *La Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Grupo Editorial Iberoamérica, México, 1991.
5. Cornell, J.A.: *Experiments whit mixtures*. John Wiley and Sons, 1981.
6. Cuppola Handbook, 6 Th .Edición, AFS.1999.
7. Pino, L.: *Caracterización tribológica de las aleaciones grises para la fabricación de camisas de motores de tractores del sector azucarero,*” revista *Centro Azúcar*, 2004.