

EFFECTO DE LAS ADICIONES DE PLOMO Y BISMUTO EN LA MAQUINABILIDAD DE LATONES

Miguel Alvarado⁽¹⁾, Patricia Zambrano⁽¹⁾, Martha Guerrero⁽¹⁾, Héctor Siller⁽²⁾

(1) Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, N.L., México

(2) Centro de Innovación en Diseño y Tecnología, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey, N.L., México.

E-mail (autor de contacto): patricia.zambranor@uanl.edu.mx

RESUMEN

Existen ciertos elementos de aleación que se añaden intencionalmente para modificar el comportamiento durante el maquinado de las aleaciones, buscando que las propiedades mecánicas de la misma no cambien, el plomo es un ejemplo. En los latones la tendencia mundial es la eliminación del plomo debido a sus efectos peligrosos para el medio ambiente y la lixiviación en el agua potable. La sustitución de este elemento no es simple. El bismuto ha surgido como un candidato, aunque la efectividad del uso de otros elementos de aleación para mejorar la maquinabilidad de latón amarillo está ligada a la solubilidad, el tamaño de las partículas y la segregación en la microestructura. Este trabajo desarrolla un experimento corto y una comparación adecuada de las propiedades de maquinabilidad necesarias para evaluar los beneficios potenciales de los futuros elementos de aleación; se compara un latón con plomo con un latón amarillo con bismuto, los cuales fueron fundidos en un horno de inducción de frecuencia media de 300 kg de capacidad. La comparación se realizó en función de criterios de maquinabilidad (rugosidad, fuerza de corte, propiedades mecánicas, tamaño de partícula y la temperatura de corte), para determinar el tamaño de partícula se realizaron análisis por medio de microscopía electrónica de barrido con un detector EDAX. La caracterización de las propiedades mecánicas se llevó a cabo por medio de pruebas de compresión en un equipo servohidráulico Instron, las pruebas de maquinabilidad se realizaron en una fresadora milltronics con un dinamómetro kistler conectado a tres canales para medir las fuerzas F_x , F_y y F_z durante el proceso los resultados fueron procesados en Labview. Finalmente se realizaron mediciones del acabado final resultante en un rugosímetro Carl Zeiss Surfcom 1500. Los resultados muestran que el latón amarillo con bismuto es 11% más difícil de maquinar que el latón con plomo.

Tópico 2: Materiales Metálicos

Introducción

El plomo es un elemento comúnmente agregado a los latones para mejorar su maquinabilidad la solubilidad del plomo en el latón es muy baja por lo tanto se precipita en pequeños glóbulos a través de los espacios que se dan en la microestructura del material. Actúa como lubricante reduciendo el coeficiente de fricción, entre la herramienta y la pieza de trabajo, por ende generando una menor temperatura durante el corte, crea discontinuidades que permiten la fragmentación de partículas. También reduce la fuerza de corte y el grado de desgaste de la herramienta.

No obstante de todas las ventajas del plomo en la mejora de la maquinabilidad su uso debe ser limitado por los riesgos de salud ambiental que implica [1]. Para poder atenerse a la legislación se han desarrollado nuevas aleaciones utilizando bismuto y selenio (patentadas como SeBiLLOYs), como por ejemplo el ecobrass, federalloy, cobres grafitados libres de plomo y otros. El Bismuto se

encuentra próximo al plomo en la tabla periódica, por lo cual se espera un comportamiento similar al introducirlo como aleante en el latón amarillo[1]. Además algunas referencias bibliográficas muestran que el bismuto promueve la fragilización del cobre y de las aleaciones de cobre[2]

La necesidad de reemplazar el plomo en las aleaciones de latón amarillo usado para los grifos de agua potable es de suma importancia. Pero al mismo tiempo es importante evaluar la efectividad de elementos sustitutos (como el bismuto) en la maquinabilidad, es también importante debido al impacto en los costos de los procesos de manufactura. Los gastos de remover material de una pieza durante un proceso de manufactura rebasa más de \$100 Billones de dólares anualmente en los Estados Unidos y de esto solo 4 procesos de maquinado son responsables del 75% de esta cifra los cuales son el torneados, taladrado, fresado y rebajado[3].

Debido a que no hay una metodología universal para evaluar la maquinabilidad y grandes cantidades de material entran al mercado cada año, mucho manufactureros están teniendo serías dificultades en la selección de los materiales más adecuados para sus productos[4]. Existe una necesidad en desarrollar procedimientos experimentales, instrumentación, métodos de medición y programaciones que puedan ser validados para la toma de decisiones en los ambientes de manufactura.

El uso de las relaciones de maquinabilidad es antiguo y ambigüo y debido a esto estos no pueden ser extrapolados para otras condiciones de maquinado; sin embargo esta investigación examina la fuerza específica de corte como principal criterio debido a su aplicación científica. Se busca lograr el desarrollo de una prueba válida y punto de comparación para la evaluación de los elementos aleantes en este caso el plomo y el bismuto.

Procedimiento Experimental

Se prepararon dos aleaciones de latón amarillo, la Aleación A (con plomo) y la aleación B (con bismuto), las muestras fueron fundidas en un horno de inducción de frecuencia media con capacidad de 300 kg, los elementos (Cu, Zn, Pb, Bi, etc.) fueron añadidos en forma pura hasta que la composición química deseada se lograba. La fusión fue hecha sin control atmosférico y la temperatura se registro con un termopar tipo J con forma de bayoneta hecho de Acero Inoxidable 316 "L" fundida a 990°C para la Aleación A y a 1016°C para la Aleación B.

Para purificar las muestras se utilizó un proceso de fundición inclinada en un molde permanente de cobre-níquel con un recubrimiento de grafito. Se purificaron 10 muestras cilíndricas de 140 mm de largo y 30 mm de diámetro, todas las muestras se maquinaron para que tuviesen un radio externo de 28 mm para remover defectos superficiales, también se les hizo un avellanado cónico de 60° en dirección a la cara inferior.

Las Aleaciones A y B fueron preparados para análisis metalográfico usando una solución de 40% HNO y 60% H₂O destilada. La composición química de las aleaciones fue determinada por un espectrómetro de emisión de chispa calibrado y certificado para aleaciones de latón amarillo.

El análisis de microscopia electrónica de barrido fue llevado a cabo a bajo vacío en una microscopio modelo JEOL-6510, se tomaron micrografías utilizando BSE en modo de composición, voltaje de aceleración de 20 kV, 11 mm WD, tamaño del spot de 50, se usaron acercamientos de 250X y 1000x. Mapas a color y análisis semicuantitativos fueron realizados para partículas de plomo y bismuto usando EDS por un detector de estado sólido EDAX Apollo de alto vacío. Se midieron un total de 50 partículas para determinar el tamaño promedio de ambas aleaciones.

La caracterización de las propiedades mecánicas fue llevada a cabo por pruebas de compresión de acuerdo a E9 [5] en una máquina servo hidráulica Instron 8502, se maquinaron probetas de compresión de 15 mm de longitud y 10 mm de diámetro fueron maquinadas para obtener una relación necesaria L/D de 1.5 necesaria para compresiones homogéneas, se uso PTFE como lubricante, la temperatura del ambiente era de 28°C, las pruebas se llevaron a cabo para alcanzar un 50% de deformación con una velocidad de pistón constante de 15 mm/min.

Se realizaron experimentos de maquinabilidad en un torno Milltronics ML14 CNC con una potencia al husillo de 7.5 kW, la velocidad máxima del mismo fue de 4000 rpm, el experimento utilizó un inserto de carburo cementado con recubrimiento de Al_2O_3 de tipo DNMG 150408 y herramienta sujetadora MDJNR 12-4B. La adquisición de las fuerzas de corte se realizó con un dinamómetro piezoeléctrico Kistler®9257 conectado a tres canales configurados por Labview®8.0. La frecuencia para las muestras fue de 1000Hz con una sensibilidad de 7.5 mV/MU y una escala de 1000MV/MU, lo que significa que 100mV equivalen a 100 newtons. El dinamómetro cuenta con la capacidad de medir simultáneamente cada una de las fuerzas ortogonales que se presentaron durante el experimento (F_x fuerza de alimentación, F_y fuerza de profundidad y F_z fuerza de corte) pero solamente la fuerza de corte F_z , consumo de potencia y la fuerza específica de corte se presentan.

La medición de R_a (rugosidad aritmética promedio) y R_z (10 puntos de altura) fue realizada en un perfilómetro Surfcom 1500 SD2 Carl Zeiss y un software recopilador de datos TiMS con una evaluación de longitud de corte de 0.8mm a 4 mm según la ISO 97[6]. La temperatura generada en el experimento de torneado fue tomada por un pirómetro infrarrojo Fluke 574 de rango de 30°C a 900°C y obtenido por el software gráfico IR, la velocidad de la muestra fue 0.125s y el coeficiente de emisividad para el latón amarillo se fijó en 0.5 de acuerdo al fabricante del pirómetro.

Tabla 1 Tabla Experimental

Número de experimento	V_c (m/min)	f_r (mm/rev)	Número de experimento	V_c (m/min)	f_r (mm/rev)
1	27	0.09	9	68	0.09
2	27	0.17	10	68	0.17
3	27	0.25	11	68	0.25
4	27	0.33	12	68	0.33
5	48	0.09	13	90	0.09
6	48	0.17	14	90	0.17
7	48	0.25	15	90	0.25
8	48	0.33	16	90	0.33

Un total de 16 condiciones de corte se muestrearon, 3 cortes por muestra, cada muestras fue maquinada a 2 diámetros, 3 replicas para cada condición de corte, un total de 48 pruebas se realizaron para cada aleación (ver tabla 1), la profundidad de corte fue constante a 2 mm, no se uso sistema de refrigeración. Los instrumentos y equipos fueron acomodados de acuerdo a la Figura 1, ya que esta configuración permite la adquisición simultánea de variables experimentales y reducir el tiempo de prueba.

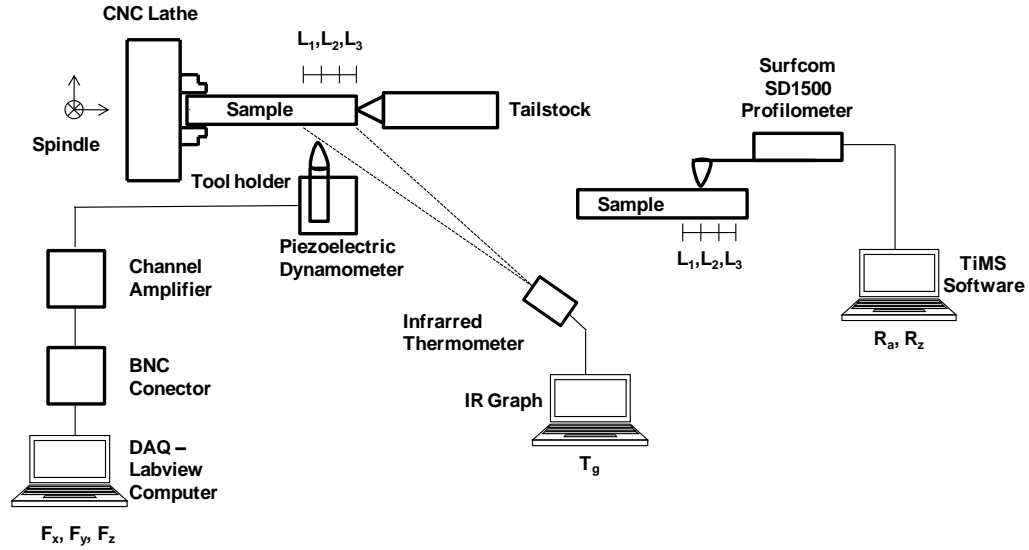


Figura 1- Arreglo de los instrumentos y equipos para las pruebas de maquinabilidad.

Resultados y discusión

Las micrografías ópticas de la Figura 2 a 200X muestra las fases α y β' , no hay diferencias en la microestructura de ambas aleaciones (lo cual era lo esperado), pero a 400X la aleación A muestra algunos tipos de agujeros presente en la fase α , esto es debido a que el plomo se disuelve con el ataque químico, la frecuencia de estos agujeros es mayor en la Aleación A que en la B (ver Figura 3). Los límites de granos no son revelados fácilmente en esta aleación [7]. La composición química para ambas aleaciones se presenta en la Tabla 2.

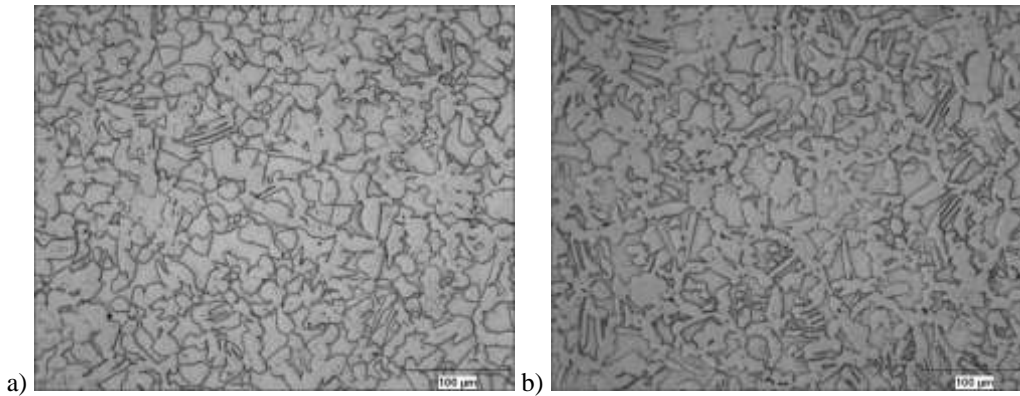


Figura 2- a) Micrografía óptica de la Aleación A a 200X b) Micrografía óptica de la Aleación B a 200X

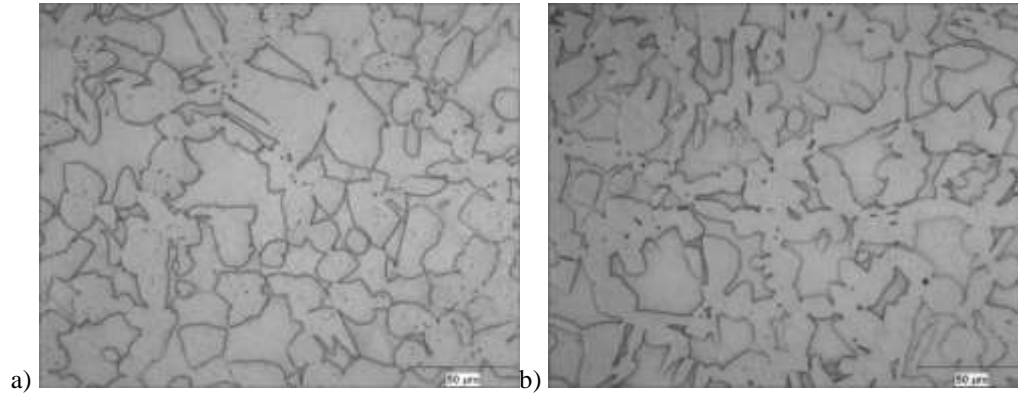


Figura 3- a) Micrografía óptica de la Aleación A a 400X b) Micrografía óptica de la Aleación B a 400X

Tabla 2 Composición Química

	Aleación A wt%	Aleación B wt%		Aleación A wt%	Aleación B wt%
Zn	37.3	39.26	Mg	0.0011	0.0012
Pb	1.430	0.055	Se	-	0.0041
Sn	0.045	0.011	Cr	0.0002	0.0002
P	0.0057	0.0097	As	0.0084	0.0076
Mn	<0.0007	<0.0007	Sb	0.041	0.033
Fe	0.041	0.061	Bi	0.032	1.010
Ni	0.106	0.127	Co	0.0084	0.0083
Si	0.017	0.016	Al	0.510	0.686
S	0.0041	0.0039	Cu	Balance	Balance
B	0.0011	0.0010			

Un análisis por SEM revela la naturaleza de los agujeros observados en la micrografía, a través de un análisis EDS puntual semicuantitativos se confirma que los mismos pertenecen a las partículas de Pb y Bi. En el SEM la aleación A muestra segregación ordenada, un tamaño promedio de partículas de 1.2 micrones y una distribución homogénea de finos glóbulos en los límites de grano por todo el material. La aleación B, en cambio muestra un tamaño de partícula de 2.3 micrones y una segregación aleatoria (ver Figura 4).

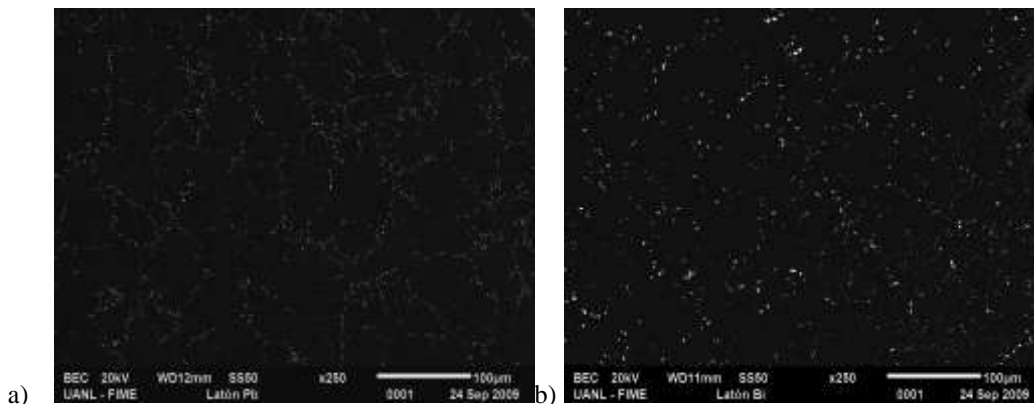


Figura 4- Distribución de partículas sobre la microestructura a) Aleación A a 250X b) Aleación B a 250X.

Los resultados de las pruebas mecánicas muestran una diferencia no significativa en las curvas de esfuerzo-deformación, Figura 5, de acuerdo a la literatura el maquinado libre no modifica las propiedades mecánicas solo el comportamiento a la maquinabilidad. Pero el modulo de falla en la compresión de la Aleación A se obtuvo una fractura cortante al alcanzar el 50% de

la deformación mientras que para la Aleación B no presentó fractura en el final del límite máximo de deformación.

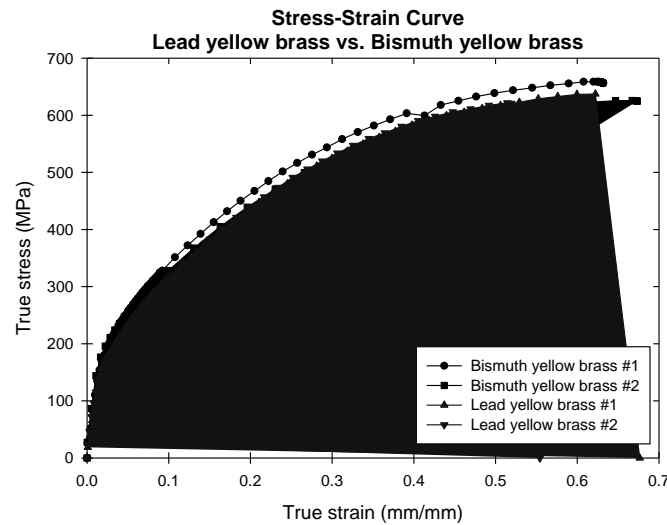


Figura 5- Curvas de esfuerzo-deformación para Aleación A (latón amarillo con plomo) y Aleación B (latón amarillo con bismuto) en la prueba de compresión.

Los parámetros de rugosidad son presentados en la Tabla 3 como el promedio de todas las condiciones, la rugosidad no presenta diferencias significativas para ambas aleaciones, lo cual se encuentra de acuerdo con Vilarinho [1] el cual sugiere que la rugosidad es independiente de la composición química.

Tabla 3 Parámetros de rugosidad

	Aleación A R_a	Aleación B R_a	Aleación A R_z	Aleación B R_z
Promedio Aritmético	2.96	2.56	16.36	13.87
Desviación estándar	0.33	0.54	1.71	2.54
Coefficiente de variación	0.11	0.23	0.10	0.20

La temperatura de corte se presenta en la Figura 6 como una gráfica de superficie de respuesta con un incremento delta entre la temperatura ambiente a la temperatura de corte, en la cual podemos ver que la Aleación B presenta una correlación directa con la velocidad de corte mientras que la Aleación A permanece prácticamente sin cambio, esto prueba que el plomo actúa como un lubricante de estado sólido reduciendo el coeficiente de fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo.

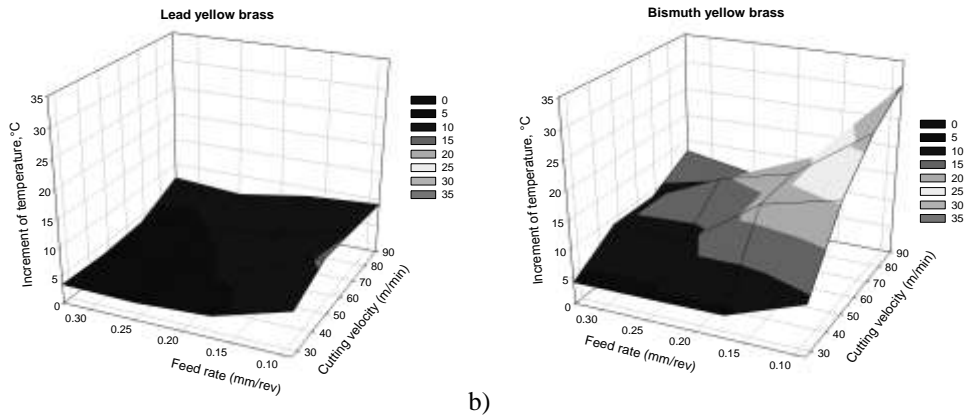


Figura 6- Incremento de la temperatura generada en el experimento Aleación A a) Aleación B b)

La figura 7 muestra la gráfica de superficie de respuesta para las fuerza cortantes F_z de ambas aleaciones, las ecuaciones de la superficie están presentadas en la ecuación 1 para la Aleación A y en la ecuación 2 para la Aleación B. Aunque no se presentaron diferencias visuales significativas en la Figura 7, existe una diferencia principal en la fuerza específica de corte para la Aleación A que es 386.6 MPa mientras que para la Aleación B es de 431.8 MPa.

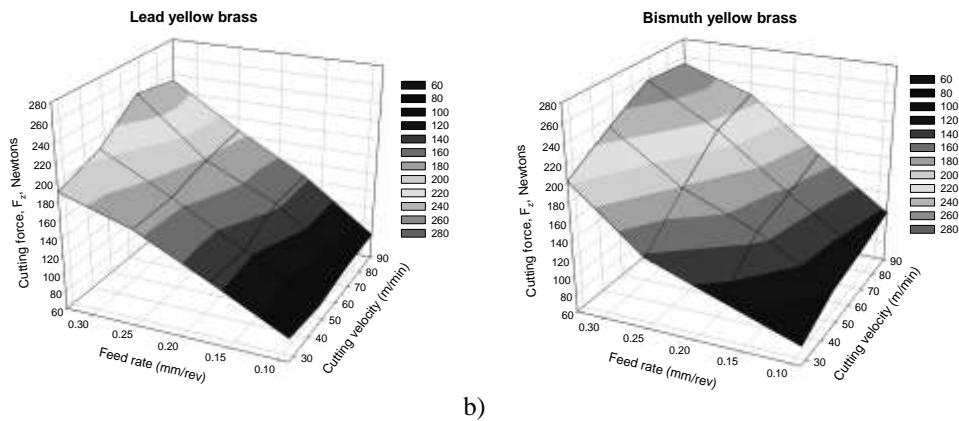


Figura 7- Gráfica de superficie de respuesta para la fuerza de corte F_z a) Aleación A b) Aleación B

ECUACIONES

$$\text{Aleación_A} = F_z = 34.1 + 0.067x + 489y + 2.675xy - 231.3y^3, r^2 = 0.800 \quad (1)$$

$$\text{Aleación_B} = F_z = -26.22 + 2.26x + 467y + 1.57xy + 5.42y^2, r^2 = 0.875 \quad (2)$$

Donde

- x = velocidad de corte (m/min)
- y = velocidad de avance (mm/rev)

Conclusiones

No se encontraron diferencias significativas en la microestructura, propiedades mecánicas, y rugosidad de ambas aleaciones. La prueba de temperatura de corte confirma que el plomo actúa como un efectivo lubricante en estado sólido, mientras que el bismuto no cuenta con esa capacidad.

El bismuto es insoluble en el latón amarillo pero la precipitación muestra ser heterogénea; además se prueba que el tamaño de la partícula de bismuto es mayor que la de plomo. Las partículas grandes pueden dificultar la migración a los límites de grano; de acuerdo a A. La Fontaine [7] la humectabilidad del bismuto es diferente para el cobre que para el latón.

El plomo segrega homogéneamente en los límites de grano con un tamaño de partícula pequeño, estos resultados correlacionan directamente la distribución de la segregación y el tamaño de partícula con la fuerza específica de corte. Se concluye de esta investigación que la Aleación B es 11.7% más difícil de maquinar que la Aleación A.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACYT por el apoyo económico para esta investigación. Agradecen al Tecnológico de Monterrey por el uso de sus equipos y laboratorios y en especial agradecen a la División de Ingeniería de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Referencias

- [1] Vilarinho C., Davim J.P., Soares D., Castro F., Barbosa J., “Influencia de la composición química en la maquinabilidad de los latones”. J Mater Process. Tech (2005), doi:10.1016/j.matprotec.2005.05.035*
- [2] D. Davies, Aleaciones en base a Cobre y Bismuto: una revision literaria. Reporte técnico, Asociación de Desarrollo del Cobre, 1993.*
- [3] Pererira A.A, Boehs L., Guesser W., “La influencia del azufre en la maquinabilidad del acero gris fundido FC25” J Mater Process. Tech. doi:10.1016/j.materprotec.2006.03.100*
- [4] Rao R. Ventaka, “Evaluación de la maquinabilidad de materiales de trabajo usando decisión de atributos múltiples”, Int J Adv Manuf Technol. doi:10.1007/s00171-004-2348-4.*
- [5] ASTM E9-09 Metodologías de pruebas de compresión materiales metálicos a temperatura ambiente.*
- [6] ISO 4287-1997 Especificaciones Geométricas de Producto (GPS) –Textura de superficie: Metodología, Terminología, definiciones y parámetros de textura de superficie*
- [7] A. La Fontaine, Keast V.J., Corta comunicación . “Distribución Composicional en latones clásicos y libres de plomo, Caracterización de Materiales 57 (2006) p. 424-429 doi:10.1016/j.matchar.2006.02.005*