

Caracterización microestructural de aleaciones de aluminio para la fabricación de casquillos de eslingas

Amable Chirino-Rodríguez
Tomás Fernández-Columbié
Dayanis Alcántara-Borges
Isnel Rodríguez-González

Resumen

El objetivo del trabajo es caracterizar microestructuralmente las aleaciones de aluminio que se emplean en la fabricación de casquillos para eslingas obtenidas por procesos de fundición. Luego de torneadas, para lograr la resistencia entre los dos elementos (casquillo-eslinga), fueron prensadas con el empleo de estampas. El ruido magnético Barkhausen permitió determinar el efecto de la compresión sobre el cable según el tipo de aleación. Las microestructuras obtenidas se caracterizaron por el tamaño del grano y su morfología de una orientación de la fase alfa en la aleación Al-Mg, estructura dendrítica con silicio eutéctico muy fino en la aleación Al-Si-Cu y estructuras poliédricas o aciculares para la aleación Al-Si-Mg; este comportamiento y una dureza de 224,8 HV permite establecer que la aleación de Al-Mg tiene mejores propiedades para ser sometida a proceso de compresión.

Palabras clave: eslingas; aleaciones de aluminio; ruido Barkhausen; casquillos; análisis microestructural.

Characterization of alloys of aluminum for the production of cases for slings

Abstract

This paper has as objective to characterize microstructures the aluminium alloys that are used in the production of cases for slings and obtained by foundry processes. After having lathed and the resistance among the two elements (case-sling) they were pressed with the employment of prints. The magnetic noise Barkhausen allowed to determining the effect of the compression on the cable according to the alloy type. The obtained microstructure is characterized by the size of the grain and their morphology by an orientation of the phase alpha in the alloy Al-Si-Mg, structures dendrites with silicon very fine eutectic in the alloy Al-Si-Cu and its structures polyhydric or acicular for the alloy Al-Si-Mg, this behaviour and a hardness of 224.8 HV, allow to settle down that the alloy of Al-Mg presents better properties to be subjected to compression process.

Keywords: slings; alloy; Barkhausen; cases; microstructures.

1. INTRODUCCIÓN

La fabricación de eslingas como elementos de izaje no es una práctica común en los trabajos de diferentes talleres de mecanizado. Para fabricar una eslinga se requiere de normas certificadas que garanticen la fiabilidad de las mismas, no obstante, las empresas que se dedican a estos menesteres utilizan, como material de unión, casquillos de aluminio sometidos a proceso de compresión, con lo que se logra una sujeción segura.

El aluminio, por sus características y ventajas en comparación con otros materiales, incluido el acero, que también se utiliza en estos menesteres, tiene una aplicación más efectiva. En correspondencia con las características distintivas que presentan las diferentes series, no todas ellas reúnen funcionalidad para ser utilizadas, sobre todo cuando las mismas se obtienen por métodos de reciclado o fundido.

En relación con la obtención de aluminios fundidos, plantean Zander y Sandström (2008) que uno de los mayores problemas asociados con estas aleaciones es la formación de cavidades a escala micrométrica, llamadas microporosidad, que causa la reducción de las propiedades mecánicas, particularmente la resistencia a la fatiga, así como una pérdida de presión por tensión y una degradación de la superficie aparente en las partes vaciadas. Según Roubicek y otros investigadores (2008) la porosidad causa costosas pérdidas por chatarra (producto de mala calidad) y puede limitar el uso de los vaciados en ciertas aplicaciones. La porosidad por contracción y gas puede ocurrir separadamente o junta, produciendo indeseables defectos en los vaciados.

1.1. Aleaciones de Al-Si vaciado o fundido

Las aleaciones de aluminio vaciado constituyen, en términos de tonelaje, el segundo grupo más grande de consumo de metales después de las aleaciones de hierro vaciado (Modern Casting 2003) y, en particular, las de tipo Al-Si son ampliamente utilizadas en la industria automotriz, estructuras aeroespaciales y aplicaciones militares, debido a sus buenas propiedades mecánicas, bajo peso, buena soldabilidad, buena conductibilidad térmica, relativamente alta resistencia a alta temperatura, excelente resistencia a la corrosión, así como excelente fluidez al vaciado (Tayibi 2004).

En estudios realizados por Dahle y demás colaboradores (2005) se reportó que en las aleaciones de Al-Si la orientación cristalográfica del aluminio en el punto eutéctico y en las cercanías son dendritas primarias. Por otra parte, Datta y otros investigadores (2004) indicaron que existen cuatro morfologías del silicio, observadas en dos estados convencionales de

solidificación. Entre estas morfologías se encuentran cristales largos ideomórficos, placas finas superficiales, cristales convencionales ramificados y formas de crecimiento cooperativo (fibrosa).

Meran, Ozturk y Yuksel (2008) mencionan que la solidificación direccional de las aleaciones aluminio-silicio puede darse lugar mediante un enfriamiento rápido. Se ha establecido que la estructura fibrosa del silicio es el resultado de un crecimiento no facetado de la partícula de silicio primario a una alta velocidad de solidificación. La transición estructural desde láminas gruesas en forma de hojuelas hasta la estructura fibrosa es acompañada por un gran subenfriamiento.

1.2. Aleaciones del sistema Al-Mg-Si

En la industria, las aleaciones del sistema Al-Mg-Si son muy prometedoras, como parte estructural de reducir el peso y mantener una alta resistencia. Algunos estudios (Corrochano *et al.* 2008) muestran que cuando el Mg y el Si son adicionados en este sistema en una proporción de Al-Mg-Si₂, o con un ligero exceso de Si respecto a esta composición, existe un marcado endurecimiento ante el envejecimiento artificial a 175 °C. Sin embargo, si se realiza un envejecimiento natural antes del envejecimiento artificial, el endurecimiento mencionado se suprime significativamente.

Según Schatzberg (2003), dada las características propias de esta aleación, no existe compuesto ternario alguno, sino una mezcla de Mg₂Si y Al₃Mg₂. El compuesto Mg₂Si, inicialmente considerado como un compuesto iónico, se comporta como un semiconductor. La solubilidad del compuesto Mg₂Si en aluminio varía de una manera muy importante, en función de la temperatura, por un lado y del exceso de magnesio, por otro. Según Youseffi y Showaiter (2006), el silicio y el magnesio se combinan entre sí para formar el compuesto denominado siliciuro magnésico Mg₂Si, el cual, a su vez, forma un sistema eutéctico simple con el aluminio.

1.3. Aleaciones del sistema Al-Cu-Mg

En este tipo de aleaciones la microestructura, el tipo de fases que aparecen y la respuesta a los microaleantes está fuertemente asociada a la composición, en particular a la proporción entre la cantidad de cobre y de magnesio presentes en la aleación. La serie Al-Cu-Mg tiene al cobre como metal de principal aleación, cuyo contenido está entre 2 % y 10 % de este elemento en el aluminio, lo que permite una adecuada solubilidad a partir de 5,65 % de cobre. Al exceder la concentración de Cu en un 15 % se forman compuestos intermetálicos que fragilizan la aleación. Este grupo presenta una resistencia extremadamente alta al aplicarle un tratamiento

térmico adecuado, además, el cobre facilita el endurecimiento por precipitación (Mann *et al.* 2011).

Según Genel (2007), el cobre con el aluminio forma una solución sólida que produce un endurecimiento en las estructuras de las piezas fundidas. Este efecto se incrementa cuando la pieza es sometida a un calentamiento posterior, con lo cual se promueve la formación de precipitados dispersos ramificados. Con estos precipitados se incrementan las propiedades mecánicas, ya sea en piezas fundidas o en las tratadas térmicamente.

1.4. Efecto del ruido magnético Barkhausen

Las emisiones de ruido magnético Barkhausen (RMB) son afectadas por cambios en la microestructura del material, el esfuerzo aplicado y las deformaciones, lo que permite utilizar el RMB como una técnica de evaluación no destructiva de materiales. En estudios realizados diferentes autores coinciden en plantear que el RMB depende de los parámetros empleados para la magnetización, entre ellos se encuentra la frecuencia (Reyes, Capó & Franco 2012) y la intensidad de magnetización (Pérez *et al.* 2005), pero existen otras dependencias como las características del material, donde se considera el tamaño de grano (Ruiz *et al.* 2008), el contenido de carbono (Capó *et al.* 2004) y el estado de tensiones (Anglada, Padovese & Capó 2001).

El trabajo tiene como objetivo determinar, a través del comportamiento microestructural y del efecto Barkhausen de las aleaciones de aluminio empleadas, cuál es la que presenta mejores condiciones para ser empleada en la fabricación de casquillos para eslingas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Análisis de la composición química

La determinación de los elementos aleantes presentes en el material fue realizada bajo el método de electrofotometría de absorción atómica y vía húmeda en un equipo marca GBC, modelo Avanta, serie A 4721. En las Tablas 1, 2 y 3 se muestra la composición química de las aleaciones AA 5050, AA 2218 y AA 6082.

Tabla 1. Composición química de la aleación AA 5050 (Al-Mg) (%)

Nomenclatura	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al
AA 5050	0,29	0,33	0,02	0,02	1,62	97,5

Tabla 2. Composición química de la aleación AA 2218 (Al-Mg-Cu)(%)

Nomenclatura	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al
AA 2218	6,72	0,92	2,76	0,03	0,41	88,9

Tabla 3. Composición química de la aleación AA 6082 (Al-Mg-Si)(%)

Nomenclatura	Si	Fe	Mg	Al
AA 6082	1,21	0,41	1,48	96,6

Luego de obtenida la composición química de cada una de las aleaciones y compararlas con los estándares establecidos por los fabricantes se determinó que existe diferencia en sus componentes, lo que presumiblemente estuvo asociado con el vertido de estos aleantes durante el proceso de fundición.

2.2. Fuerza de conformado

Son las fuerzas de compresión generadas por la reacción entre la pieza y la matriz. Como el proceso se va a desarrollar en frío y conformado de un paso, se requerirá de mayores esfuerzos; esto permitirá la posibilidad de grandes cambios de forma, romper la estructura cristalina y constituir otra más refinada de granos pequeños.

El proceso se realizará con estampas cerradas; estas herramientas conformadoras permitirán el desplazamiento de una contra la otra, con el involucramiento totalmente de la pieza o en una extensión considerable. Se empleará una fuerza de 6,5 MPa.

2.3. Comportamiento microestructural

Se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL, modelo NIM-100, que está dotado de una cámara instalada con el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe. Para observar las probetas se nivelaron en un dispositivo con plastilina. Las microestructuras de las Figuras 1, 2 y 3 se corresponden con las estructuras metalográficas de las muestras patrones de las aleaciones de aluminio.

La Figura 1 se corresponde con la aleación aluminio-magnesio; se observa que los cristales de magnesio eutéctico tienen forma acicular y ramificada, con contornos puntiagudos que favorecen la aparición de microgrietas y reducen la ductilidad de la aleación.

En la Figura 2 se detectó, en numerosos puntos, la presencia de una estructura de tipo eutéctico, situada en los límites de las dendritas desarrollados durante la solidificación. Esta microestructura consiste en brazos dendríticos primarios y secundarios de fase α -Al, segregación interdendrítica que contiene una placa de silicio, rodeada por un halo de fase α -aluminio que están encapsuladas por eutéctico irregular del tipo Al- Si.

La muestra 3 presentó una morfología del silicio con combinación de láminas y hojuelas, algunas gruesas y distribuidas uniformemente. También se observó que existen ciertas partículas dispersas dentro de las dendritas de silicio; se perciben muchas partículas finas dentro de la estructura eutéctica al igual que pequeñas láminas.

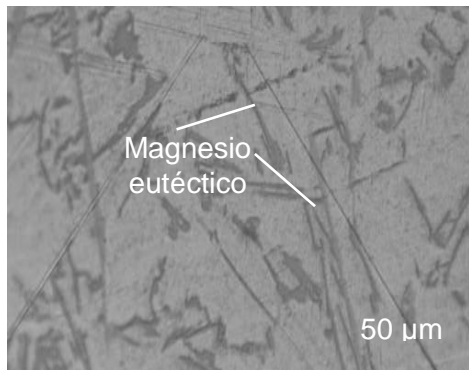


Figura 1. Aleación Al-Mg.

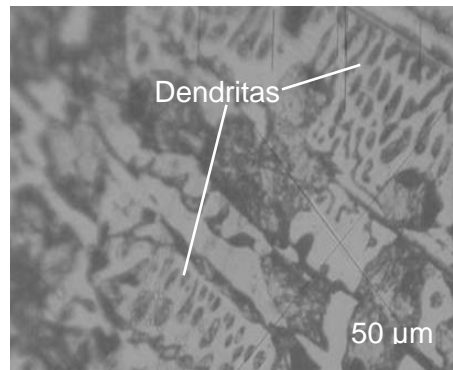


Figura 2. Aleación Al-Si-Cu.

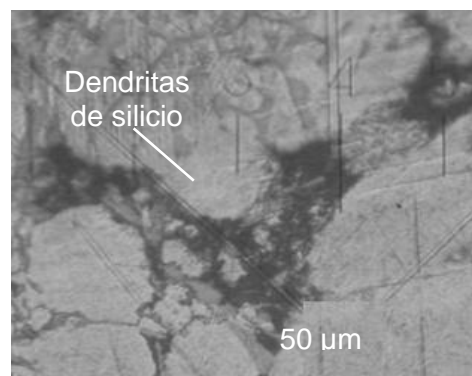


Figura 3. Aleación Al-Si-Mg.

2.4. Medición del RMB en los casquillos comprimidos

En las Figuras 4, 5 y 6 se muestran los puntos en los que se realizaron las mediciones a los casquillos con las eslingas luego del proceso de compresión.



Figura 4. Al-Mg.

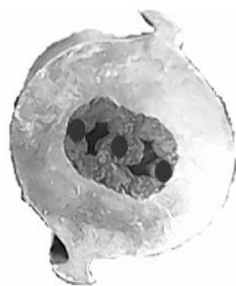


Figura 5. Al-Mg-Si.

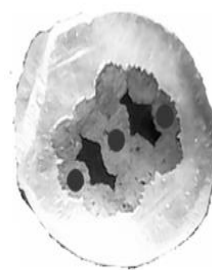


Figura 6. Al-Si-Cu.

Teniendo en cuenta que el movimiento de las paredes de los dominios magnéticos está fuertemente influenciado por la microestructura del material y el mecanismo de deformación que lo rige, con el surgimiento de los mismos se produce un freno al movimiento de las paredes. El ruido magnético Barkhausen es aplicable a materiales magnéticos, en este estudio no pudo ser posible analizar los casquillos por estar fabricados de aluminio, por lo que hubo que realizar mediciones en los cables luego del proceso de compresión.

El objetivo de este ensayo fue para determinar el nivel de compresión, en correspondencia con el tipo de aleación utilizada. Se realizaron al menos tres mediciones de la variación del voltaje en cada muestra; fueron repetidos tres veces en cada punto para establecer la media en la variación.

2.5. Ensayo de dureza

En la medición de la microdureza se utilizó un microdurómetro modelo PMT-3 No 168, que tiene acoplado un objetivo acromático con compensación libre trinocular de tubo inclinado a 30°. La Figura 7 muestra una huella de indentación realizada para el análisis.

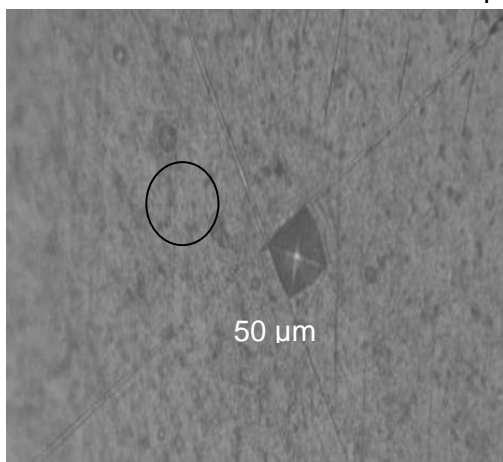


Figura 7. Huella de indentación realizada para el análisis de microdureza.

Se efectuaron tres mediciones en diferentes lugares que se promediaron; la carga aplicada fue de 0,49 N, en un tiempo de 15 s. El indentador empleado fue una pirámide de diamante, con un ángulo de 136°

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis microestructural de la aleación aluminio-magnesio

Con objeto de apoyar la identificación de las diversas transformaciones detectadas se procedió a realizar el análisis del examen microscopio para observar las posibles transformaciones. Las Figuras 8 y 9 se corresponden con las estructuras de la aleación aluminio-magnesio, luego del proceso de compresión.

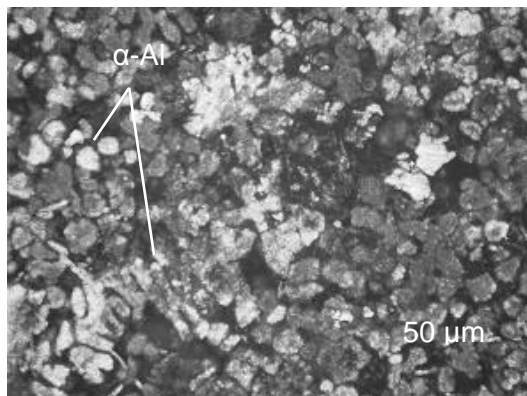


Figura 8. Muestra de la periferia.

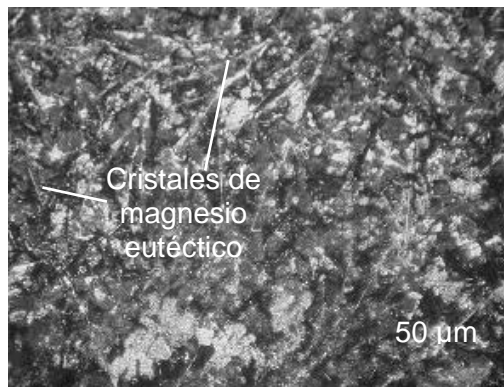


Figura 9. Muestra del centro.

Un incremento de la velocidad en la compresión, con una fuerza de 6,5 MPa, produce una mayor segregación del eutéctico (Figura 8), a bajas temperaturas (34 °C); se observa una mayor orientación de las fase alfa en la dirección perpendicular a la presión (Figura 9). En las micrografías se observa que el silicio tiende a desaparecer de la zona central, esto se justifica por el efecto de la compresión.

El silicio se desplaza hacia la periferia con el microconstituyente eutéctico líquido que ha fundido a menor temperatura (175 °C) y que no sea tan evidente este efecto puede ser debido al mayor tamaño del silicio. Por otro lado, el magnesio precipita, preferentemente, en los límites de grano como una fase altamente anódica, lo cual produce susceptibilidad al agrietamiento intergranular y a la corrosión por esfuerzo. La adición de magnesio incrementa fuertemente la resistencia del aluminio sin reducir su ductilidad.

3.2. Análisis microestructural de la aleación Al-Si-Cu

En las Figuras 10 y 11 se muestra el análisis microestructural de las muestras conformadas de la aleación Al-Si-Cu, obtenidas luego del proceso de compresión por estampado.

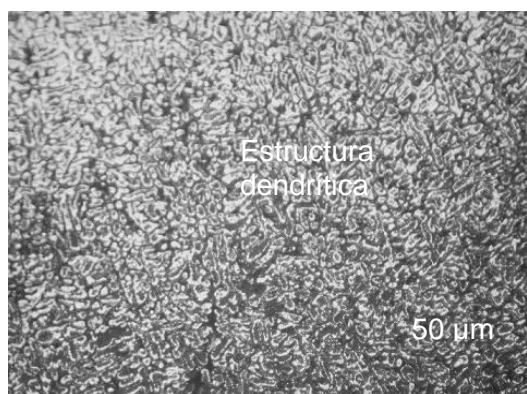


Figura 10. Muestra de la periferia.

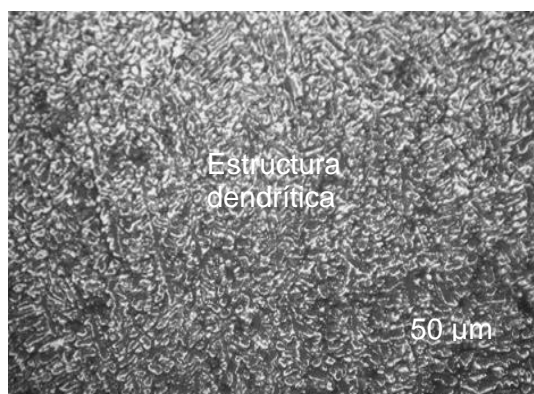


Figura 11. Muestra del centro.

En las estructuras se observa, en determinadas zonas, un aspecto parcialmente dendrítico con silicio eutéctico muy fino y cierta porosidad. No se observa una estructura de fase alfa globular rodeada de microconstituyente eutéctico típica de los procesos de conformación; se distingue un pequeño redondeo de las dendritas y un consecuente crecimiento del tamaño de la fase alfa, pero no muy acentuado, casi inapreciable a pocos aumentos así como un pequeño incremento en el tamaño de las partículas de silicio, justificado por el calentamiento de la muestra.

Si en las aleaciones el cobre está en proporciones muy bajas (como en este caso de estudio), un tratamiento de solución permite disolver los elementos solubles o esferoidizar los compuestos metaestables; de esta manera, se rompe su continuidad en la matriz para conducir a aumentar la ductilidad de la aleación. De igual manera, la deformación plástica rompe la red de compuestos frágiles y los distribuye en la matriz. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que los desbalances entre ciertos elementos aleantes y la presencia de elementos traza (Fe y Cr) pueden conducir a que en algunas aleaciones vaciadas se disminuya esta condición, para conducir a piezas de baja calidad superficial.

3.3. Análisis microestructural de la aleación Al-Si-Mg

Se realizó el análisis de la microestructura de la aleación aluminio-silicio magnesio; las Figuras 12 y 13 muestran este comportamiento, asociado a las fuerzas de compresión aplicadas a las mismas.

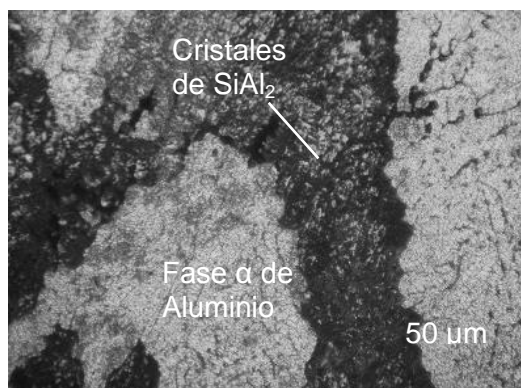


Figura 12. Muestra de la periferia.

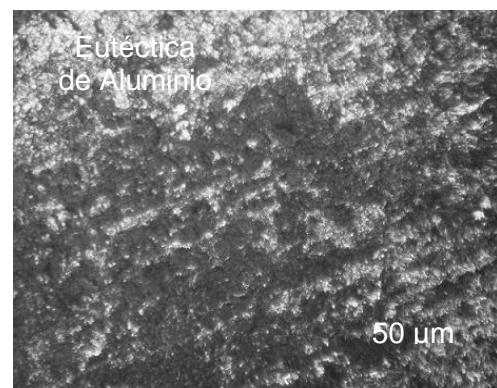


Figura 13. Muestra del centro.

Como se puede observar en las micrografías en las zonas centrales quedan zonas con muy poco silicio eutéctico. Existen zonas que en su totalidad son fase alfa y que, junto al aluminio, hay una matriz de cristales de SiAl₂; hay en ella otros dos constituyentes, uno de color gris y con tendencia a tener, en general, formas poliédricas o aciculares, mientras que la cuarta fase

presenta una coloración gris oscura con cierta tonalidad y forma irregular, con cristales de menor tamaño que el resto de los constituyentes que forman la eutéctica.

La proporción relativa de esta última fase parece ser muy variable de unos campos a otros, observándose masas en las que su presencia es muy escasa, mientras que en otras ocasiones su proporción es mucho mayor. Esta eutéctica cuaternaria aparece esporádicamente en forma globular y con constituyentes de tamaño pequeño.

3.4. Análisis del efecto Barkhausen aplicado a los cables

Se analizan los resultados de magnetización registrados para el ruido Barkhausen para las diferentes muestras. La Figura 14 se corresponde con la aleación AA 5050 (aluminio-magnesio).

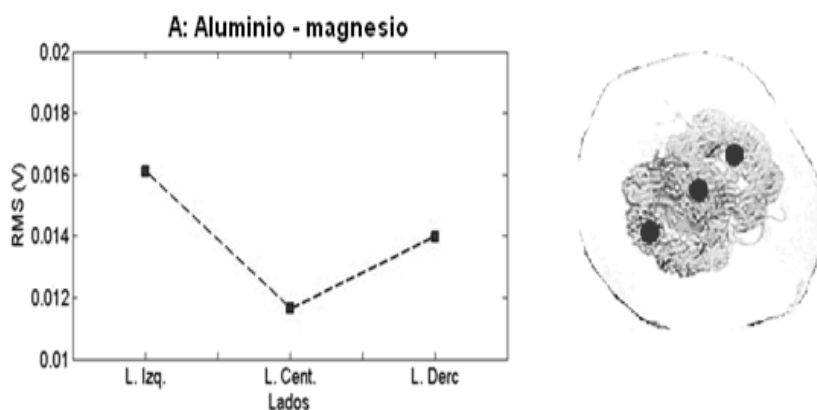


Figura 14. Caracterización magnética de la aleación AA 5050.

Se puede observar en la Figura 14 que, después de aplicada la magnetización en el cable, luego de ser comprimido, se ha obtenido, tanto en el lado izquierdo como en el lado derecho, un comportamiento muy similar. Esto demuestra que la aleación AA 5050 (aluminio-magnesio) ha fluido satisfactoriamente entre los alambres que componen la eslinga, lo cual está originado por la plasticidad que presenta esta aleación. La diferencia que se muestra en ambos lados, presumiblemente está ocasionado por una imperfección o mala colocación de la estampa durante el proceso.

En la Figura 15 se muestran los resultados de la magnetización en los cables de la aleación AA 6082 (aluminio-silicio-magnesio) luego del proceso de magnetización.

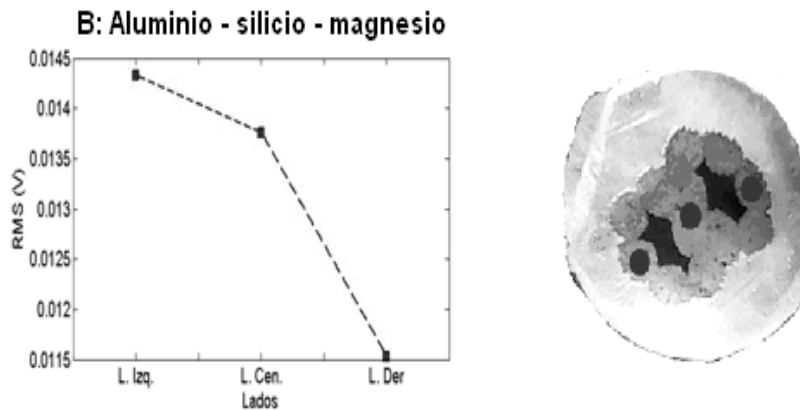


Figura 15. Caracterización magnética de la aleación AA 6082.

Una distribución irregular presentan los puntos obtenidos en la magnetización de la aleación, tal y como se muestra en la Figura 15, donde el lado derecho revela una menor afectación de la señal, que demuestra que en este extremo, el punto de cedencia del material es mayor e indica que el material tiene una mayor pérdida de energía y, por lo tanto, sufrió un endurecimiento debido a la carga aplicada, no así para el lado izquierdo donde se puede observar una ligera afectación. Los resultados pueden estar asociados a la formación de cristales de SiAl_2 , que introducen una mayor dureza en la aleación y, por ende, una menor resistencia a la tracción de la eslinga.

En la Figura 16 se puede observar el comportamiento obtenido de la magnetización en la aleación AA 2014 (aleación de aluminio-silicio- cobre).

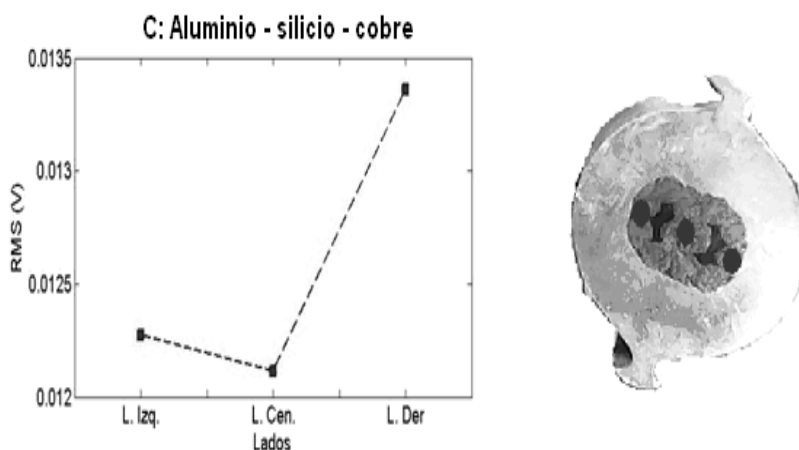


Figura 16. Caracterización magnética de la aleación AA 2218.

En la aleación AA 2218 se observa una distribución de los puntos similares a la aleación AA 6082, pero para el lado derecho, afectado por la dureza que se ha alcanzado en el cable, que puede estar ocasionado por la presencia de la estructura dendrítica con el silicio eutéctico y el elemento cobre, lo cual le

confiere a la aleación una menor ductibilidad; esto ofrece mayor resistencia a ser conformado y afecta la superficie de la eslinga.

Con los resultados de la magnetización analizadas para cada aleación, Al-Mg ha sido la menos afectada por daños debido a esfuerzos mecánicos (compresión). Se encontró que en las diferentes zonas o puntos analizados existen discrepancias significativas en las aleaciones AA 6082 y la aleación AA 2218, con respecto a la aleación AA 5050. En estos puntos, el RMB mostró un aumento en la amplitud de la señal, a medida que los puntos se alejaban de la región comprimida, mientras que el ancho de cada una de ellas se reduce.

La Figura 17 muestra el comportamiento de las envolventes obtenidas en cada una de las aleaciones luego de ser procesada con el empleo del ruido magnético Barkhause.

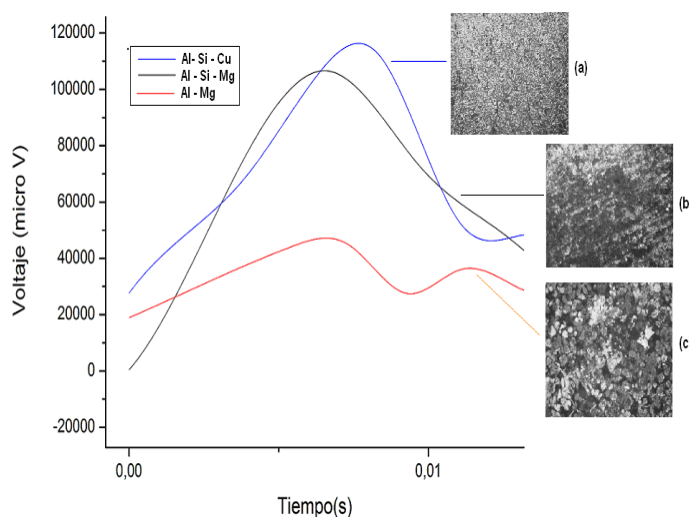


Figura 17. Comportamiento de las envolventes en cada aleación (cable).

Como se observa en la Figura 17, en el cable de la aleación de aluminio-magnesio se ha mantenido en la superficie un aumento del tamaño de grano (microestructura c), lo que condujo a un material magnéticamente más dúctil. Por consiguiente, se percibe la aparición más temprana del ruido Barkhausen (RB) (línea roja) y también una disminución en las señales de RB. Tanto el valor del pico máximo como el gráfico de la raíz media cuadrática (RMS) de toda la señal disminuyeron, mostrándose la aparición de dos picos, a diferencia de las demás aleaciones, que presentan un solo pico.

En la curva azul (aleación Al-Si-Cu) se observa un pico de mayor amplitud. Este resultado muestra un mecanismo diferente del movimiento de las paredes de dominios, distinto del encontrado en las otras dos muestras y originado por la aparición de granos de menor tamaño (microestructura a),

lo que induce mayor dureza. Resultado casi análogo que el que muestra la curva negra (aleación Al-Si-Mg), que promueve también la aparición de dominio magnético muy semejante en cuanto a tamaño de grano y de dureza (microestructura b). En ambos casos se observa la aparición de un solo pico.

La presencia de una alta densidad de dislocaciones ocasiona que los saltos Barkhausen sean cortos y consecuentemente de baja amplitud. Este comportamiento se ve reflejado en las señales de la Figura 16, observándose que cada una de las emisiones de ruido magnético Barkhausen (RMB) contiene un gran número de saltos (señal ancha) pero de baja amplitud.

3.5. Análisis de las durezas en las aleaciones

Las mediciones se realizaron por el método de Vickers; se hicieron, al menos, tres mediciones para cada muestra en diferentes lugares. Los valores de dureza son mayores cuando se aumenta la fuerza de compresión, lo que incrementa la tensión residual mínima y es similar para los distintos casquillos. En la Tabla 4 se muestra la microdureza de las diferentes aleaciones.

Tabla 4. Dureza en las diferentes aleaciones antes y después de la deformación

Aleación	Posición	HV _{inic}	HV _{final}
Al-Mg-Si (AA 6082)	Centro	100	221,7
	Centro-borde		
	Borde		
Al-Mg (AA 5050)	Centro	90	199,3
	Centro-borde		
	Borde		
Al-Si-Cu (AA 2218)	Centro	140	224,8
	Centro-borde		
	Borde		

Como se observa en la tabla anterior existe variación en la microdureza de las diferentes aleaciones luego de realizado el proceso de ensamble y compresión por estampado. Ha existido un incremento de esta propiedad mecánica, desde 140 HV hasta 224,8 HV para la aleación Al-Si-Cu, precedido por la aleación de Al-Mg-Si, desde 100 HV hasta 221,7 HV y, por último, con una menor resistencia a la conformación la aleación Al-Mg que, desde una microdureza de 90 HV, esta se incrementa hasta 199,3 HV. Lo

cual demuestra que por estos resultados es más conveniente el empleo en la fabricación de eslinga esta última aleación.

4. CONCLUSIONES

- Las microestructuras obtenidas en cada una de las aleaciones y caracterizadas por el tamaño de los granos y su morfología, con una orientación de la fase alfa en la aleación Al-Mg, estructura dendrítica con silicio eutéctico muy fino en la aleación Al-Si-Cu y estructura poliédricas o aciculares para la aleación Al-Si-Mg, permiten establecer que la aleación de Al-Mg presenta mejores propiedades para ser sometida a proceso de compresión sin provocar efecto de agrietamiento en ella.
- Las envolventes determinadas con el efecto magnético Barkhausen para las diferentes muestras demostró que el mayor pico se corresponde con la aleación de Al-Si-Cu, precedida por la aleación Al-Si-Mg y con un menor pico para la aleación Al-Mg, lo que garantiza que esta última aleación presenta mejores propiedades mecánicas.
- En las diferentes durezas de las aleaciones de aluminio de las series AA 2218, AA 5050 y AA 6082 existe un incremento de esta propiedad desde 199,3 HV para la aleación Al-Mg hasta 224,8 HV para la aleación Al-Si-Cu, lo cual permite plantear que la menor dureza obtenida en la aleación Al-Mg es la más adecuada para la fabricación de los casquillos de las eslingas.

5. REFERENCIAS

- ANGLADA, J.; PADOVESE, L. & CAPÓ, J. 2001: Magnetic Barkhausen Noise and hysteresis loop in commercial carbon steel: influence of applied tensile stress and grain size. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 231(11): 299-306.
- CAPÓ, J.; PÉREZ, J.; PADOVESE, L. & SERNA, C. 2004: Dependence of the Barkhausen Magnetic Emission with carbon content in commercial steel. *Journal of Materials Science* 39(6): 1367-1370.
- CORROCHANO, J.; CERECEDO, C.; VALCÁRCEL, V.; LIEBLICH, M. & GUITIÁN, F. 2008: Whiskers of Al₂O₃ as reinforcement of a powder metallurgical 6061 aluminium matrix composite. *Materials Letters* 62(1): 103-105.
- DAHLE, A.; NOGITA, K.; MCDONALD, S.; DINNIS, C. & LU, L. 2005: Eutectic Modification and Microstructure Development in Al-Si Alloys. *Materials Science and Engineering A* 413-414: 243-248.
- DATTA, J.; DATTA, S.; BANERJEE, M. & BANDYOPADHYAY, H. 2004: Beneficial effect of scandium addition on the corrosion behavior of Al-Si-Mg-SiCp

- metal matrix composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 35(9): 1003-1008.
- GENEL, K. 2007: The effect of pitting on the bending fatigue performance of high-strength aluminum alloy. *Scripta Materialia* 57(4): 297-300.
- MANN, R.; HEXEMER, R.; DONALDSON, I. & BISHOP, D. 2011: Hot deformation of an Al-Cu-Mg powder metallurgy alloy. *Materials Science and Engineering A* 528(16): 5476-5483.
- MERAN, C.; OZTURK, O. & YUKSEL, M. 2008: Examination of the possibility of recycling and utilizing recycled polyethylene and polypropylene. *Materials & Design* 29(3): 701-705.
- MODERN CASTING. 2003: Know your Competition 7th Census of World Casting Production - 2002. Modern Casting Staff Report. Modern Casting. Diciembre. p. 23-25.
- PÉREZ, J.; CAPÓ, J.; ANGLADA, J. & PADOVESE, L. 2005: A model for the influence of microstructure defects on magnetic Barkhausen noise in plain steels. *J. Magn. Magn. Mater* 288(122): 433-442.
- REYES, F.; CAPÓ, J. & FRANCO, E. 2012: Modelo matemático para la caracterización del envejecimiento del acero 12Cr1MoV superenvejecido a partir del efecto Barkhausen. *Ingeniería Mecánica* 15(1): 66-72.
- ROUBICEK, V.; RACLAVSKA, H.; JUCHELKOVA, D. & FILIP, P. 2008: Wear and environmental aspects of composite materials for automotive braking industry. *Wear* 265(1-2): 167-175.
- RUIZ, D.; PIOTRKOWSKI, R.; LOPEZ, M. & RUZZANTE, J. 2008: Ruido Barkhausen y emisión magneto acústica para la caracterización de materiales ferromagnéticos. *Revista Matéria* 13(1): 12-22.
- SCHATZBERG, E. 2003: Symbolic culture and technological change: The cultural history of aluminium as an industrial metal. *Enterprise and Society* 4(2): 226-271.
- TAYIBI, H. 2004: *Tratamiento de los polvos procedentes de la Metalurgia Secundaria del Aluminio*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. España. 150 p.
- YOUSEFFI, M. & SHOWAITER, N. 2006: PM processing of elemental and pre alloyed 6061 aluminium alloy with and without common lubricants and sintering aids. *Powder Metallurgy* 49(3): 240-252.
- ZANDER, J. & SANDSTRÖM, R. 2008: One parameter model for strength properties of hardenable aluminium alloys. *Materials and Design* 29(7): 1540-1548.

Amable Chirino-Rodríguez, achirino@ismm.edu.cu

Master en Ciencias. Profesor Asistente. Departamento de Mecánica
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.

Tomás Fernández-Columbié, tfernandez@ismm.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Departamento de Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba

Dayanis Alcántara-Borge,s dalcantara@ismm.edu.cu

Ingeniera mecánica. Profesora Asistente. Departamento de Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.

Isnel Rodríguez-González, irgonzalez@ismm.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Departamento de Mecánica
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba