

INFLUENCIA DE LOS COMPUESTOS INTERMETÁLICOS SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y EL TRATAMIENTO TÉRMICO T6 PARA ALEACIONES DE ALUMINIO A356

E.J Mendoza ⁽¹⁾, J.M Bedoya ⁽¹⁾, E. Marín ⁽²⁾, S.A Rúa ⁽¹⁾, E. Uribe ⁽³⁾ y H.V. Martínez ⁽¹⁾

(1) Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana, COLOMBIA.

(2) Facultad de Ingeniería Química, Universidad Pontificia Bolivariana, COLOMBIA.

(3) Dirección Técnica, Inversiones Uribe Molina, Medellín, COLOMBIA

E-mail: emigdio.mendoza@correo.upb.edu.co

RESUMEN

Las aleaciones Al-Si son comúnmente utilizadas para la fabricación de piezas metálicas ligeras, con buena resistencia mecánica y alta conductividad tanto eléctrica como térmica, lo que las ha posicionado como aleaciones muy importantes en la producción de componentes metálicos usados en montajes de sistemas de distribución eléctrico. En este estudio, conectores eléctricos que fueron fabricados por procesos de fundición en molde en arena y en molde metálico en la empresa Inversiones Uribe Molina, mostraron que las propiedades mecánicas de los conectores en aluminio A356, son afectadas por la presencia de elementos de aleación o contaminante principalmente el hierro presente en el aluminio reciclado, que es usado como materia prima en el proceso de fundición. Se evaluó por microscopía óptica y electrónica de barrido, la formación de compuestos intermetálicos durante el proceso de solidificación y tratamiento térmico, ya que estos modifican en forma significativa las propiedades mecánicas de dichos conectores, por lo general, la resistencia mecánica y la dureza es controlada por el tamaño y las características morfológicas del silicio y los compuestos intermetálicos de Al-Si-Mg, Al-Si-Fe, que precipitan en la matriz de aluminio. La morfología, el tamaño y la concentración de estos precipitados, los cuales cambian durante tratamientos térmicos de temple y envejecido, permitieron correlacionar estas características, con la resistencia y la dureza para piezas fabricadas en molde metálico y arena. Además se pudo encontrar que el hierro presente está ocasionando problemas de fragilidad en las piezas cuando los intermetálicos Al-Si-Fe precipitan en la solidificación, incrementan su tamaño durante la etapa de temple en el tratamiento térmico y continúan creciendo durante el envejecido, sin modificarse el crecimiento acicular. A pesar que se reduce la dureza y se incrementa la resistencia mecánica de las piezas, luego de realizar el tratamiento térmico, es menos nocivo el efecto de estos intermetálicos en las piezas que se fabrican en molde metálico.

Tópico: Tópico 2: Materiales metálicos

Palabras Claves: Aleaciones de aluminio, A356-T6, conectores eléctricos, análisis microestructural.

1. INTRODUCCIÓN

Como conectores eléctricos aéreos comúnmente se utilizan grapas de fijación, que pueden ser de retención o suspensión (figura 1), para transmisión eléctrica en redes de distribución, las cuales trabajan en rangos de potencial entre 7 y 44 kV. Además de ser necesario buenas propiedades eléctricas, las grapas cuya función es tensionar o suspender (sostener) el conductor en el sistema eléctrico, deben soportar cargas en tracción cercanas a las 8000lbf, por lo que estos elementos se fabrican en aleación de aluminio A356, con un tratamiento térmico T6, que le permita adquirir las propiedades mecánicas y eléctricas necesarias en dicha aplicación [1-3].

Entre los defectos más comunes de las piezas fabricadas en aleaciones de aluminio A356, está la porosidad, generada por gases o contracciones durante los procesos de solidificación, que resultan en un empobrecimiento de las propiedades mecánicas tales como resistencia a la tensión, ductilidad, fragilidad, resistencia a la fatiga y modifica las características de propagación de las grietas durante fallas mecánicas [4].

El incremento del contenido de hierro para aleaciones de aluminio A356 reduce la resistencia a la fatiga, ya que la formación de compuestos intermetálicos ricos en hierro que crecen en forma acicular, promueven la generación y crecimiento de microgrietas. Para aleaciones A356, con contenidos de hierro inferiores a 0.57% en peso, los principales intermetálicos que se forman son $Al_8Mg_3FeSi_6$ y $Al_{15}Fe_3Si_2$, los cuales no afectan significativamente la resistencia a la fatiga, sin embargo, para contenidos de hierro mayores de 0.97% en peso, la resistencia a la fatiga disminuye abruptamente, debido a la formación de intermetálicos de Al_5FeSi , que no solubilizan en el tratamiento térmico T6, actuando estos intermetálicos como concentradores de esfuerzo e iniciadores de la falla por fatiga, luego de aplicar una carga mecánica en forma cíclica [5-7].

Las propiedades mecánicas de las aleaciones Al-Si-Mg, están gobernadas por el nivel de magnesio retenido en la matriz de aluminio después del tratamiento de solución y temple, el cual está disponible para la precipitación durante el proceso de envejecimiento. El porcentaje de magnesio disuelto y los parámetros de envejecimiento, controlan el límite elástico de la aleación y el grado de endurecimiento. Una matriz con elevado contenido en magnesio tiene un límite elástico y un nivel de endurecimiento mayor, mientras que baja la ductilidad y la tenacidad a fractura [8].

El tratamiento T6 se utiliza generalmente para incrementar el límite elástico y la resistencia a tracción. Si se desea un producto que tenga buena maquinabilidad hay que incrementar la dureza [9,10].



Figura 1. (a) Conector eléctrico fabricado en molde metálico y en arena y (b) ensamble del conector en un sistema de conexión eléctrica, para prueba de tracción.

En este trabajo, se realizó un estudio microestructural de conectores eléctricos fabricados por fundición en molde en arena y en molde metálico, con el fin de evaluar la evolución durante el tratamiento térmico T6, las características morfológicas de los compuestos intermetálicos y correlacionarlas con la resistencia a la tracción y la dureza de los elementos eléctricos fabricados, con miras a definir como realizar tratamientos térmicos óptimos para conectores fabricados a partir de aluminio reciclado.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se fabricaron conectores eléctricos en molde en arena y molde metálico en la empresa Inversiones Uribe Molina, utilizando una aleación de aluminio A356, cuya composición bajo norma es de 6,5-7,5 Si, 0,25-0,45 Mg, 0,2 máx Fe, 0,2 Cu, 0,1Zn, 0,1Mn, 0,2Ti y aluminio balance. Las cuales fueron tratadas térmicamente (T6), se realizaron tratamientos de temple a 540°C luego de 6 y 12 horas de sostenimiento, y envejecidos a 160°C durante 3,5 horas, tomando muestras para determinación de composición química, microestructura y dureza, durante cada una de las etapas del proceso, en la tabla 1 se resumen las condiciones evaluadas.

Tabla 1. Matriz de ensayos y nomenclatura de cada una de las muestras

	Tipo de molde	
	Arena	Metálico
Colado	CA	CM
Temple 6 horas	T6A	T6M
Temple 12 horas	T12A	T12M
Temple 6 horas envejecido 3.5 horas	T6EA	T6EM
Temple 12 horas envejecido 3.5 horas	T12EA	T12EM

2.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA Y ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL

La composición química de cada una de las muestras, fue determinada usando un espectrómetro de emisión óptica de arco y chispa Q4 Tasman, mientras que por la combinación de microscopía óptica (MO) en un microscopio LEYCA referencia DMLM y microscopía electrónica (SEM) en un Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM-6490LV, se evaluó la morfología y composición química de los intermetálicos precipitados. A las diferentes muestras se les realizó una preparación metalográfica, usando lijas de carburo de silicio números 100, 220, 400, 600 y luego se realizó un pulido fino, a 200-250 rpm, con partículas de diamante mono cristalinos de 6 y 3 micrómetros en suspensión y terminado el pulido con partículas de óxido de magnesio de 0,5 micrómetros. Para el ataque químico se utilizó ácido fluorhídrico al 0.5% V/V durante 5 segundos a temperatura ambiente.

2.2. ENSAYOS TRACCIÓN Y DUREZA

El ensayo de tracción fue realizado en un montaje en la empresa Inversiones Uribe Molina (figura 1b), el cual permite evaluar la carga máxima en libras fuerza, que soporta una grapa bajo condiciones de operación real, además que se puede apreciar si existe deslizamiento entre las diferentes partes del sistema, lo cual es necesario evitar y depende principalmente de dureza y calidad de la superficie en el conector.

Para la medición de dureza se tomó una muestra de cada una de los conectores y se procedió a preparar la superficie de acuerdo a las recomendaciones de la norma ASTM [11], para medición de dureza Rockwell en materiales metálicos. El equipo utilizado para realizar las mediciones fue un durómetro digital, marca BUEHLER modelo Macromet 5100T, utilizando un penetrador de carburo de tungsteno de diámetro 1/16 de pulgadas y una carga de 100 kgf, Obteniendo la dureza promedio de cada una de las muestras en la escala Rockwell B.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al caracterizar químicamente los conectores fabricados tanto por molde metálico como por molde en arena, a partir de material reciclado de aluminio, se encontró que existe una alta aleatoriedad de la composición química de la colada por efecto de impurezas de la chatarra de aluminio como se muestra en la tabla 1, pero principalmente cabe destacar que el contenido de hierro aunque en algunos casos es alto, no supera los valores permitidos bajo norma. En este caso cuando el contenido de hierro es alto, también debería incrementarse el contenido de manganeso el cual para estos conectores no es muy alto, lo que permite que se de la formación de intermetálicos de Fe-Si-Al, que no experimentan solubilidad y globalización durante el tratamiento térmico T6, por lo que se pueden promover problemas de fragilidad en los conectores.

Tabla 2. Rango composicional para los elementos eléctricos fabricados

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
Min	6.50	0.18	0.018	0.0052	0.31	0.018	0.0026	Balance
Máx	7.50	0.53	0.211	0.0096	0.37	0.040	0.0040	

Luego de evaluar por microscopía óptica estos conectores, podemos observar que el contenido de hierro motiva la formación de compuestos intermetálicos en forma acicular, que pueden alcanzar hasta 100um de longitud para conectores fabricados en molde en arena (figura 2a), dado que la velocidad de solidificación es lenta y permite la nucleación y crecimiento del compuesto intermetálico durante la transformación líquido-sólido, por tener alto punto de fusión en comparación con la matriz de aluminio, mientras que en las piezas fabricadas por molde metálico, precipitan intermetálicos son más finos y mejor distribuidos (figura 2b). Al estudiar la evolución de estos intermetálicos durante el T6, se observó que a medida que se incrementa el tiempo de temple se activan procesos difusivos, que permiten el crecimiento del intermetálicos rico en Fe y no su disolución ni esferoidización.

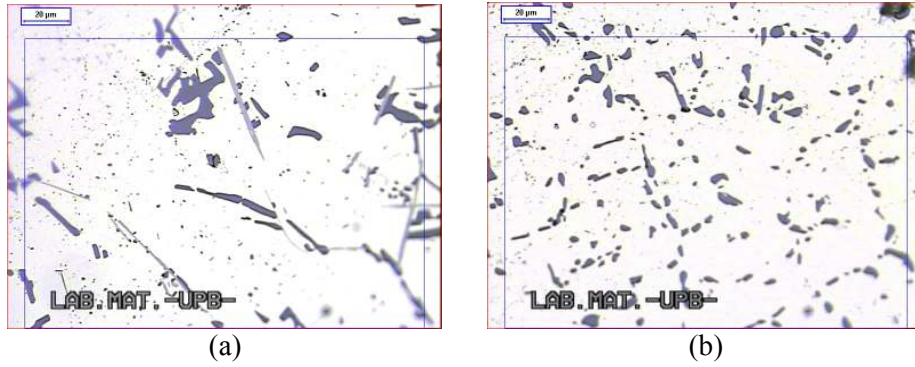


Figura 2. Micrografía óptica para muestras templadas a 540°C 12 horas y envejecidas a 160°C 3.5 horas, a 500x y atacadas con ácido fluorhídrico al 0.5% (a) molde en arena y (b) molde metálico

Con base en la caracterización por SEM-EDS, se corroboró la composición de los intermetálicos precipitados, que se podían apreciar ópticamente, encantándose precipitados de Al-Si-Mg-Fe y Al-Si en forma globular, Al-Si-Fe acicular en una matriz de aluminio con algo de silicio en solución sólida. Como se observa en la imagen y los espectros de composición de la figura 3.

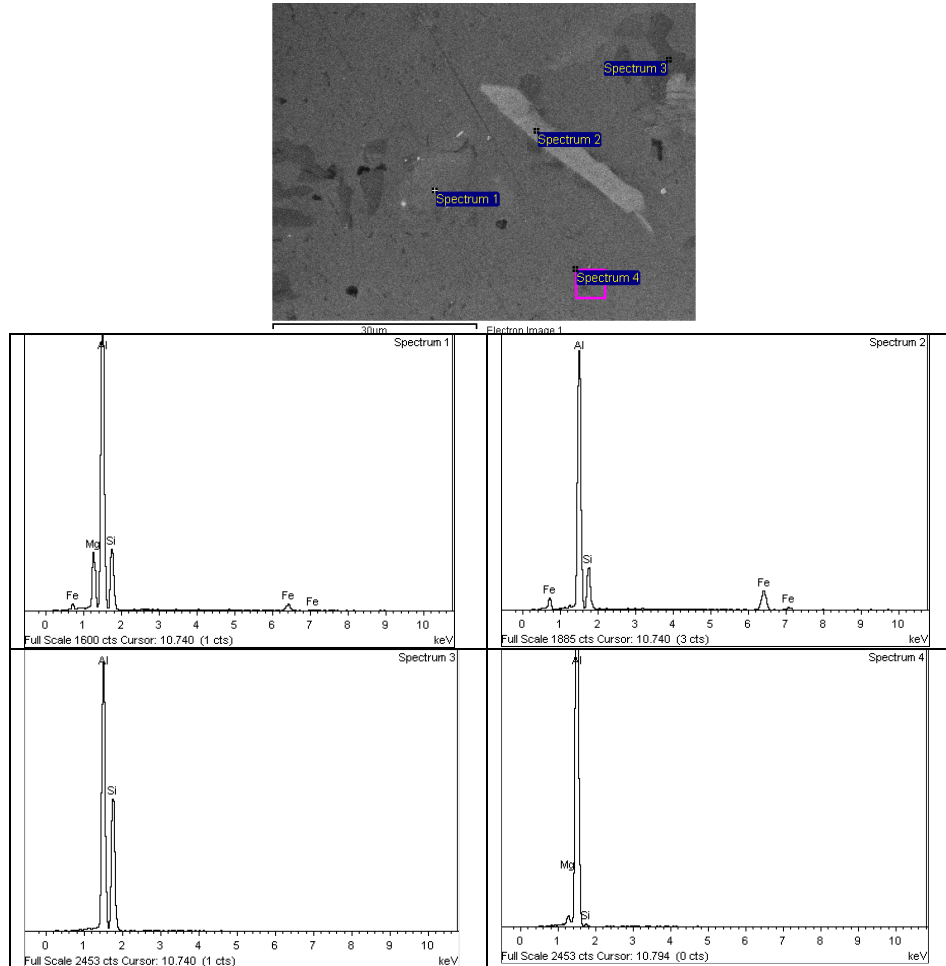


Figura 3. Imagen de EDS-SEM, para conector producido en molde en arena templada 6 horas (T6A)

Al evaluar el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas, se encontró que los conectores fabricados por molde en arena, luego de ser tratados térmicamente, logran soportar una carga en promedio 8338 lbf con una desviación estándar de 88 lbf, lo que está muy cercano al mínimo de carga que permiten las normas para fabricación de grapas de retención y suspensión [1-3], además que mostraron en algunos casos deslizamiento del

sistema. Mientras que las grapas fabricadas en molde metálico, incrementaron su resistencia a la tracción, alcanzando en promedio una resistencia de 9739 lbf, con una desviación estándar de 131 lbf, este incremento de la resistencia está asociado con la formación de intermetálicos más finos y homogéneamente distribuidos, que precipitan durante la solidificación de la aleación, disminuyéndose la concentración y el tamaño de partículas concentradoras de esfuerzos que fragilizan los conectores.

Los resultados de las mediciones de dureza se muestran en la figura 4, indican que existe una drástica reducción de dureza en los conectores durante la etapa de temple en el tratamiento térmico [12,13], por la solubilización de compuestos intermetálicos de aluminio-silicio. Para las piezas fabricadas en molde en arena la dureza pasa de 28.3 HRB a 9.8 o 10.5 HRB y se incrementa levemente en el envejecido hasta 11.5 HRB, independientemente del tiempo de temple al que haya sido sometido. Sin embargo, en los conectores fabricados en molde metálico, el cambio de dureza durante el temple es abrupto pasando de 56.0 HRB a 6.5 o 8.3 HRB, esto es debido a la liberación de muchos esfuerzos internos generados durante la solidificación de la fase intermetálica, además que existe mayor disolución de los precipitados, ya que área superficial de los intermetálicos en la matriz de aluminio es mayor y finalmente en el envejecido se precipita el exceso de silicio en la matriz de aluminio y se logra una dureza de 9 HRB.

Esto se debe a que la etapa de puesta en solución de un tratamiento T6, desempeñan varias funciones importantes: disolución del Mg₂Si, homogeneización de la solución sólida y esferoidización y engrosamiento del silicio eutéctico. Continuando con una prueba de envejecido en la cual se precipita nuevamente los intermetálicos disueltos. Puede notarse que en el endurecimiento por envejecimiento se llegó a un mismo valor de dureza para ambos procesos de temple; Esto se debe a la formación de precipitados coherentes con la matriz, a partir de esta solución sólida sobresaturada [14].

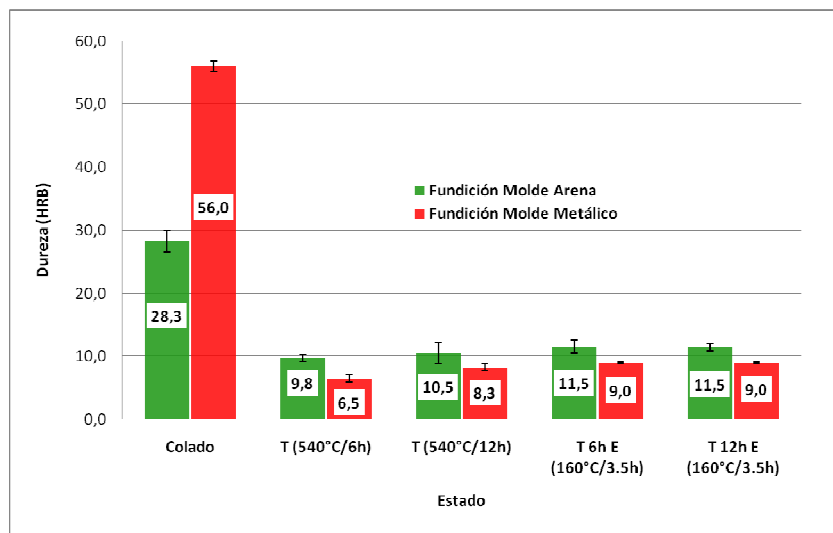


Figura 4. Dureza en HRB para diferentes estados de la aleación A356: Colado, T: Temple a diferentes tiempos y un E: Envejecido posterior a cada temple.

4. CONCLUSIONES

Al fabricar conectores eléctricos utilizando aluminio reciclado, no es posible controlar en forma precisa la composición de la aleación, lo que genera la formación de compuestos intermetálicos, que modifican el comportamiento mecánico de los conectores.

Cuando se fabrican conectores en molde de arena, se precipitan en el conector menor cantidad de intermetálicos, pero estos son de mayores tamaños y más aciculares, que los que precipitan en conectores fabricados en molde metálico, siendo inversa la relación entre el tamaño de los intermetálicos y el comportamiento mecánico.

Durante el tratamiento térmico T6, los únicos intermetálicos que no experimentan solubilidad en la matriz de aluminio, son los intermetálicos Al-Si-Fe, los cuales continúan creciendo y no globulizan durante el temple, lo que no permite incrementar en forma significativa la resistencia mecánica de las piezas luego del T6.

Cuando el contenido de hierro es muy alto, es conveniente reducir el tiempo del temple, para evitar el crecimiento excesivo de los intermetálicos Al-Si-Fe.

La alta dureza en las piezas en estado colado y fabricadas en molde metálico, es debido al fino tamaño de los intermetálicos, que generan un incremento de los esfuerzos internos por el aumento del área interfacial entre el intermetálico y la matriz.

5 AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a COLCIENCIAS por el financiamiento del proyecto 1210-404-20776 del cual hace parte este trabajo. De igual manera, a la empresa Inversiones Uribe Molina por la confianza depositada en el grupo GINUMA y al CIDI-UPB por el apoyo administrativo.

6. REFERENCIAS

1. Instituto colombiano de normas técnicas y certificaciones. “Electrotecnia. Herrajes y accesorios para redes y líneas aéreas de distribución de energía eléctrica. Tornillos y tuercas de acero galvanizado. Serie inglesa”. Bogotá ICONTEC (norma NTC 2618).1992. pp. 1-16.
2. Instituto colombiano de normas técnicas y certificaciones. “Electrotecnia. Herrajes y accesorios para redes y líneas aéreas de distribución de energía eléctrica. Grapas de suspensión”. Bogotá ICONTEC (norma NTC 2772).1990. pp. 1-10.
3. Instituto colombiano de normas técnicas y certificaciones. Electrotecnia. Herrajes y accesorios para redes y líneas aéreas de distribución de energía eléctrica. Grapas de retención. Bogotá ICONTEC (norma NTC 2973).1991. pp. 1-15.
4. H.R. Ammar, A.M. Samuel, F.H. Samuel, “Effect of casting imperfections on the fatigue life of 319-F and A356-T6 Al–Si casting alloys, *Materials Science and Engineering A* 473 (2008) 65–75
5. J.Z. Yi, Y.X. Gao, P.D. Lee, T.C. Lindley, “Effect of Fe-content on fatigue crack initiation and propagation in a cast aluminum–silicon alloy (A356–T6)” *Materials Science and Engineering A* 386 (2004) 396–407
6. Q.G. Wang, D. Apelian, D.A. Lados, “Fatigue behavior of A356-T6 aluminum cast alloys. Part I. Effect of casting defects” *Journal of Light Metals* 1 (2001) 73-84
7. Q.G. Wang, D. Apelian, D.A. Lados, “Fatigue behavior of A356/357 aluminum cast alloys. Part II - Effect of microstructural constituents” *Journal of Light Metals* 1 (2001) 85-97
8. Shivkumar S., Ricci S., Keller C., Apelian D., Effect of solution treatment parameters on tensile test of cast aluminium alloys, *Journal Heat Treating*, 8, 1, (1990), 63-70.
9. Kenney M. P., Courtois J. A., Evans R. D., Farrior G. M., Kyonka C. P., Koch A. A., Young K. P., *Semisolid Metal casting and Forming*, *Metals Handbook*, 9th Edition, 15, (1998), 327-338.
10. Young K., Eisen P., SSM (Semi-Solid Metal) technological alternatives for different applications, *Metallurgical Science and Technology*, 18, 2, (2000), 11-15.
11. ASTM E18-05 “Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials”, American Society of Testing and Materials (ASTM) (2005).
12. Rometsch P. A., Schaffer G.B, “An age hardening model for Al-7Si-Mg casting alloys”, *Materials Science and Engineering A*, 325, 1-2, (2002), 424-434.
13. Young P., Kenneth Dr., SSM casting process: applications and case stories in aluminium and magnesium, NADCA, Indianapolis T95-115, (1995), 403-409.
14. Shang-Nan Chou, Jow-Lay Huang, Ding-Fwu Lii, Horng-Hwa Lu, The mechanical properties of Al₂O₃/aluminum alloy A356 composite manufactured by squeeze casting, *Journal of Alloys and Compounds* 419 (2006) 98–102