SOLDADURA POR FRICCION-AGITACION DE ALEACIONES LIGERAS – UNA ALTERNATIVA A NUESTRO ALCANCE

Fernando Franco A[1], Hugo Sánchez [1‡], Diana Betancourt[1], Orlanis Murillo[2]*

- ✓ Este artículo forma parte del "Volumen Suplemento" **S1** de *la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* (*RLMM*). Los suplementos de la RLMM son números especiales de la revista dedicados a publicar memorias de congresos.
- ✓ Este suplemento constituye las memorias del congreso "*X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)*" celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008.
- ✓ La selección y arbitraje de los trabajos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*, quien nombró una comisión *ad-hoc* para este fin (véase editorial de este suplemento).
- ✓ La *RLMM* no sometió estos artículos al proceso regular de arbitraje que utiliza la revista para los números regulares de la misma.
- ✓ Se recomendó el uso de las "Instrucciones para Autores" establecidas por la *RLMM* para la elaboración de los artículos. No obstante, la revisión principal del formato de los artículos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*.

Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (3): 1369-1375

SOLDADURA POR FRICCION-AGITACION DE ALEACIONES LIGERAS – UNA ALTERNATIVA A NUESTRO ALCANCE

Fernando Franco A[1], Hugo Sánchez [1‡], Diana Betancourt[1], Orlanis Murillo[2]*

1: Esuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle. Cali, Colombia
2: Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle. Cali, Colombia

*E-mail: * ffranco@univalle.edu.co; ‡ hsanchez@univalle.edu.co*

Trabajos presentados en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET
Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008

Selección de trabajos a cargo de los organizadores del evento

Publicado On-Line el 29-Jul-2009
Disponible en: *www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html*

Resumen

Soldaduras hechas por fricción agitación usando una maquina fresadora universal sobre aleaciones estructurales de aluminio y de magnesio, con relaciones de velocidad de rotación a velocidad de avance entre 3 y 16 rev/mm, han presentado buena calidad y muy buenas propiedades mecánicas, comparados con uniones soldadas por procesos convencionales tipo GMAW. La resistencia mecánica de las SFA en aleaciones de aluminio 6261T6 alcanzo hasta un 84% de la resistencia del metal base; mientras que para aleaciones de magnesio AZ31B se ha logrado hasta un 85% de la resistencia a la tensión del metal base. La microestructura esta compuesta por granos equiaxiales muy finos resultante de los fenómenos de recristalizacion dinámica ocurrida durante el proceso. Las mediciones de microdureza han mostrado la zona del cordón con mayores durezas respecto al metal base, pero con variaciones típicas en estos materiales. Sin embargo, las probetas soldadas sometidas a los ensayos de tensión muestran una zona de falla en el borde del cordón, donde se produce un plano de debilidad debido aparentemente a la acumulación de óxidos o a la presencia de microtexturas desfavorables para la deformación plástica del material.

Palabras Claves: *Soldadura por fricción-agitación, aleaciones de aluminio, aleaciones de magnesio, recristalizacion dinámica.*

Abstract

The Friction stir welded joints on structural aluminium and magnesium alloys, made by using a universal milling machine with rotation speed to travel speed ratio between 3 and 16 rev/mm, have presented very good quality and mechanical properties compared to the welded joints by conventional processes like GMAW. Tensile strength of FSWed Aluminium alloy 6261-T6 rise to 84% of that of the parent metal; while for FSWed magnesium alloy AZ31B, the tensile strength rise to 85% of the base metal. The general microstructure is composed of equiaxed fine grains resultant from the dynamic recrystallization phenomena produced during the welding process. Microhardness tests have shown higher values in the nugget zone than in the base metal, but with typical variations for this type of materials. However, the welded specimen showed a failure zone in the limit of the welds , where planes of weakness are presented due to the accumulation of oxides or the presence of microtextures non favourable to the plastic deformation during tensile tests.

Keywords*: Friction Stir Welding, Aluminium alloys, Magnesium alloys, dynamic recrystallization. Guide for Authors, Format, MS-Word Template, Styles*

1. INTRODUCCIÓN

El aluminio y el magnesio son metales estructurales liviano, con una elevada resistencia especifica, por lo tanto proveen una oportunidad valiosa para reducir el peso de elementos estructurales y así mejorar la economía del combustible y reducir las emisiones peligrosas producidas en la industria del transporte cuando se sustituyan los diseños mas pesados hechos con los aceros tradicionales. [1]

La soldadura por fricción-agitación fue inventada y desarrollada en el TWI de Inglaterra, en 1991 y ha permitido el desarrollo de aplicaciones importantes que han causado un impacto en la producción y en el uso de los metales livianos [2]. El proceso permite la soldadura de metales como el aluminio, magnesio, cobre y acero, incluyendo muchas aleaciones consideradas de difícil soldabilidad por procesos convencionales por fusión.

Muchos trabajos de investigación se han enfocado en la interpretación de los cambios de microestructura y de propiedades mecánicas en la unión soldada por efecto de las principales variables del proceso de soldadura por fricción-agitación. Mishra [3], presentó una revisión de los principales aspectos microestructurales y mecánicos especialmente enfocados hacia las aleaciones de aluminio.

Otros investigadores han trabajando con aleaciones de magnesio, como una alternativa prometedora frente a las aleaciones tradicionales. Abbasi [4], encontró que al aumentar la relación $\mathbf{V_R /V_\omega}$, entre 2.5 y 70 rev/mm, se produce un leve decrecimiento en la resistencia de fluencia, la resistencia ultima y la elongación de las distintas zonas de la unión soldada. La resistencia mecánica es mayor y la elongación es menor en la zona nugget comparada con la zona termomecánica mente afectada.

Xunhong [5], estudio el efecto de las relaciones de velocidad de rotación a velocidad de soldadura entre 6.3 y 25.3, para 950 rpm, y entre 10 y 40 rev/mm para 1500 rpm, en aleaciones AZ31 y encontró refinamiento de grano, por efecto de la recristalizacion dinámica; mientras que en la ZTMA los granos son severamente deformados y que presentan una dispersión muy fina de fases íntermetálicas del tipo $Mg_{17}Al_{12}$.

Park [6], analizo la distribución de la microtextura en la SZ de la aleación forjada de magnesio AZ61 y reporto que los componentes de la textura con una fuerte acumulación de los planos basales {0001} a lo largo de la superficie de la columna del pin de la herramienta fueron heterogéneamente distribuidos en la SZ. Ellos explicaron la evolución de la textura durante el proceso FSW por efecto de la deformación cortante que surge de la rotación del pin duro durante el proceso.

Lim [7], investigo el comportamiento en tensión de soldaduras FSW de la aleación de magnesio AZ31B-H24 y el mecanismo que explica el deterioro de las propiedades mecánicas. El efecto de la relación de velocidades entre 6 y 16 rev/mm, mostró una tendencia a reducir la resistencia mecánica hasta en un 40% y de la ductilidad hasta en un 90% de las uniones soldadas con respecto al material base original. Lim explico esta pérdida de propiedades en una aleación AZ31-H24 por la acumulación de partículas de óxido de magnesio en el límite de la ZS y la ZTMA en el lado de avance, donde se produce la falla de las probetas durante el ensayo.

Cabot, et.al. [8], evaluó la eficiencia mecánica de SFA, usando una fresadora, de la AA 6061T6 de 6.25 mm, para un rango de relación de velocidades de 5 a 15 rev/mm. Se encontró que al aumentar la velocidad de soldadura, para una velocidad de rotación constante de 1500 rpm, la resistencia mecánica aumento levemente, debido a un menor calor de fricción aportado y un ciclo térmico de soldadura mas corto. La eficiencia de la junta soldada alcanzo al 80%, pero satisfaciendo los valores de resistencia mecánica requeridos por el código estructural. D. Santiago, et. al. [9][10], evaluaron el ciclo térmico y la distribución de temperaturas en las juntas soldadas por fricción-agitación hechas con fresadora sobre AA6061.

Meran [9], uso la fresadora con una herramienta cilíndrica roscada para producir soldaduras por fricción-agitación en placas de latón $Cu_{30}Zn$ de 3 mm de espesor, con resultados satisfactorios, sin evaporación de zinc y sin poros. Las mejores propiedades de la unión soldada se obtuvieron con velocidad de rotación de 2050 rpm y velocidad de soldadura de 112 mm/min, para una relación de velocidades de 18.3 rev/mm.

Recientemente el TWI, reconociendo la opción de usar la fresadora como equipo alternativo para la ejecución de las uniones soldadas por SFA, en especial para empresas de baja capacidad económica, presenta un sistema para controlar y regular la carga normal durante ejecución de la soldadura en la fresadora.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

El proceso de soldadura por fricción-agitación se desarrollo a partir de la adaptación de una fresadora universal Cervinia de 4 HP con velocidades de rotación hasta de 1500 rpm y velocidad de avance hasta de 210 mm/min., con carrera de 600 mm- Ver **Figura 1**. La carga normal de soldadura, se midió mediante un dispositivo mecánico con strain-gages acondicionado al respaldo de las probetas durante la ejecución de la soldadura y se mantuvo constante en un valor aproximado de 200 Kg.



Figura 1. Ilustración de la fresadora y el montaje de las placas para realizar las soldaduras por fricción-agitación

Las juntas soldadas a tope a lo largo de la dirección de conformado del material, se hicieron sobre platinas cortadas de perfiles extrudados, de 180X300X3 mm. de las aleaciones de Al 6261T5 y de Mg AZ31B, cuya composición química se presenta en la **Tabla 1**.

Tabla 2. Velocidades del proceso.

Muestra	*Vr [rpm]*	*Va [mm/min]*	*Vr/Va [rev/mm]*
1500A	1500	210	7,1
1500B		136	11,0
1500C		94	16,0
750B	750	105	7,1
750C		68	11,0
480A	480	210	2,3
480B		136	3,5
480C		94	5,1

Tabla 1. Composición química nominal de las aleaciones estudiadas.

Aleación	*Al*	*Mg*	*Si*	*Fe*	*Mn*	*Cu*	*Cr*	*Zn*	*Ti*
AA: 6261T5	Bal.	0.83	0.69	0.17	0.25	0.27	0.018	0.003	0.018
Mg: AZ31B	3.00	Bal.		0.005	0.20	0.05		1.0	

Las variables para el proceso SFA que se tuvo en cuenta para la caracterización en este proyecto fueron la velocidad de avance o de soldadura (V_a), y la velocidad de rotación del pin (V_r), de manera que las relaciones de velocidades de rotación/avance usados estaban entre 4 y 16 rev/mm, buscando determinar los rangos óptimos de operación del sistema, con el mínimo deterioro posible de las propiedades mecánicas en la unión soldada y garantizar la sanidad total de la unión. Las condiciones de soldadura ensayadas se presentan en la Tabla 2.

Se uso un pin cilíndrico, para las dos aleaciones, y otros cónicos roscados, solo para la aleación de aluminio, fabricados en acero de herramientas con tratamiento térmico de temple y revenido para una dureza final aproximada de 55HRC. Las dimensiones de la herramienta se presentan en la **Tabla 3**.

De las placas soldadas se sacaron muestras representativas para la evaluación mecánica, mediante ensayos de tensión, doblado y microdureza de las uniones soldadas. La evaluación microestructural se realizó en planos transversales al cordón de soldadura mediante el análisis metalográfico óptico y electrónico de barrido.

Se realizo además un macroanálisis de defectos para verificar cómo las variables inciden para que el tiempo de llenado del poro sea mayor que el tiempo de formación, para eliminar los posibles defectos en el cordón, de manera que se garantizara un llenado completo de los poros. Zhang [13]

Tabla 3. Dimensiones de la herramienta utilizada para el proceso de SFA.

Parámetro	*Medida [mm.]*
Ø Hombro	12.0
Ø Pin	4.8
Longitud Pin	2.9
Rosca	UNF

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Aleación de Aluminio 6261T5

El excelente aspecto superficial de las juntas soldadas, se suma a la ausencia de defectos como grietas y poros, en la sección transversal en casi todos los casos. La macrografia de la **Figura 2**, muestra la diferencia de forma del cordón obtenidos para el pin cilíndrico y el pin cónico. El ancho del cordón se reduce notoriamente en la raiz, afectando menos material, en el caso del pin cónico.

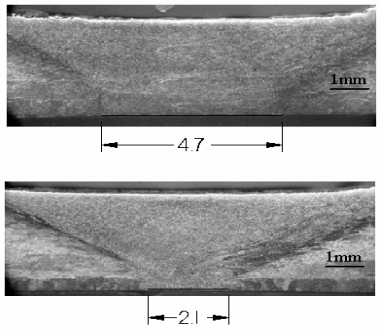


Figura 2 Micrografía de las juntas soldadas con pin cilíndrico y con pin cónico.

Sin embargo, las juntas soldadas a 480 rpm con pin cónico, presentaron un túnel de poros en la raíz del cordón, debido a la falta de calor suficiente para producir el flujo plástico del material, razón por la cual la falla de las probetas de tensión se produjo por la raíz del cordón.

Las restantes probetas fallaron de manera dúctil por la ZTA en el lado de avance, como se muestra en la **Figura 3**.

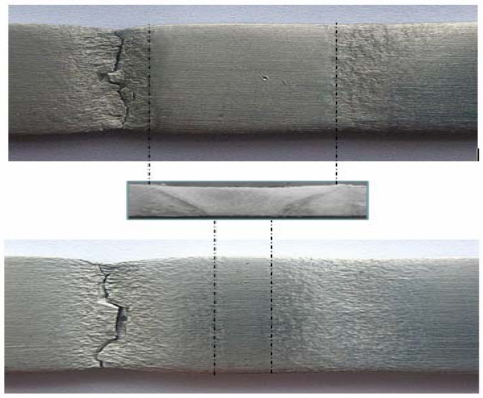


Figura 3. Localización de la zona de falla en ZTA del lado de avance de las probetas de tensión.

Se encontró que al aumentar la velocidad de soldadura, para cada velocidad de rotación, aumentó ligeramente la resistencia a la tensión de la junta soldada, como muestra la **Figura 4**. Mientras que, la ductilidad de las juntas soldadas presentó una tendencia contraria. La eficiencia mecánica de junta más alta se logró con 1500 rpm, para los dos tipos de herramientas usadas; alcanzando un valor máximo del 84%. Amu y otros [14], en su estudio mecánico y metalúrgico de las uniones soldadas por GMAW, con material de aporte tipo ER 5356, de la AA6261T5, obtuvo una eficiencia de junta del 87%.

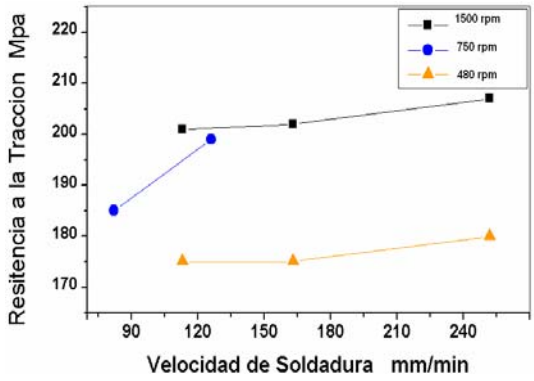
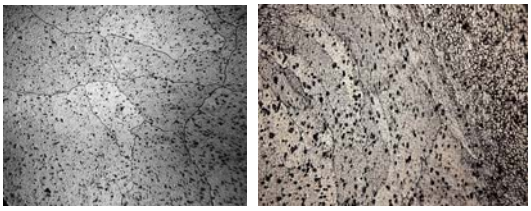


Figura 4. Efecto de la velocidad de soldadura sobre la resistencia la tension de las juntas soldadas de AA6261T5.

La microestructura del metal base està compuesta por granos equiaxiales grandes con precipitados coherentes en su interior, resultantes del tratamiento termico de envejecimiento. Ver **Figura 5**(a). Por su parte, la microestructura de la ZA està compuesta por granos muy finos, con los precipitados endurecedores disueltos por efecto de la temperatura alcanzada. Al lado de la ZA se encuentra la ZTMA con grandes granos alargados mostrando la evidencia del flujo de material durante la soldadura por friccion. Ver **Figura 5**(b).



(a) (b)

Figura 5. Microestructura encontrada en (a) el limite de las ZA y ZTMA, comparada con (b) el metal base.

3.2 Aleación de Magnesio AZ31B

La inspección visual inicial con ayuda de tintas penetrantes mostró que todos los cordones realizados presentaron un muy buen aspecto superficial. Ver

Figura 6. Sin embargo, se encontraron algunas indicaciones de falta de penetración en la raíz en las probetas de Mg -1500A y 480A.

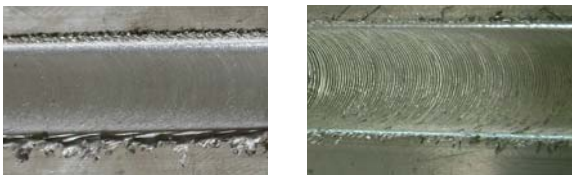


Figura 6. Aspecto superficial de las SFA de Mg-AZ31B. Los bordes del cordón presentan la rebaba típica del proceso.

El análisis macrográfico de las juntas pulidas y atacadas en cortes transversales, mostró un aumento en el ancho de la zona agitada conforme se incrementó la V_r de la herramienta, como lo muestra la **Figura 7**. Con excepción de la muestra de Mg-480A, que presentó un poro a una distancia de 0.8 mm de la raíz de la junta sin conexión directa con la línea de unión, las restantes muestras resultaron sanas.

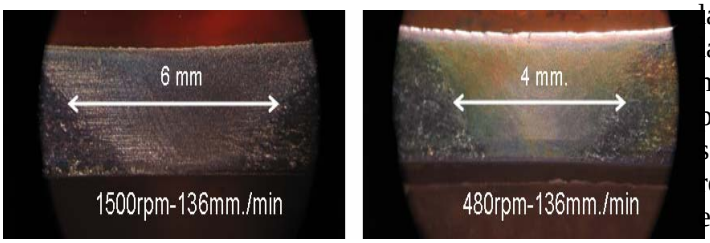


Figura 7. Cambio del ancho de la zona agitada por efecto de la V_r en Mg-AZ31B.

Los resultados de los ensayos de microdureza Vickers, con carga de 200 g. y tiempo de 10 s., mostraron en todos los casos, un aumento notorio de dureza en el cordón de soldadura, con valores superiores a la dureza del metal base. Se observa en la **Figura 8**, que al aumentar la velocidad de soldadura se produjo un incremento de la dureza, como resultados del refinamiento de grano producido. Se encontró también que al aumentar la velocidad de rotación, para la misma velocidad de soladura, se produjo una disminución de las durezas obtenidas.

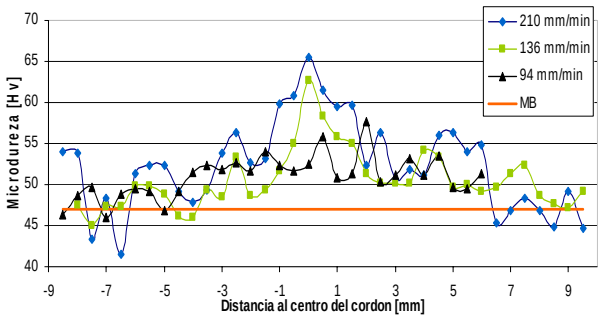


Figura 8. Perfiles de microdureza Vickers en función de la velocidad de soldadura para 1500 rpm. (200 g. y 10 s.).

El incremento en la velocidad de soldadura, Va, para cada velocidad de rotación, aumenta la resistencia mecánica de la unión; sin embargo, para 480 rpm la resistencia mecánica alcanza un máximo para 136 mm./min., pero luego decrece levemente. Ver **Figura 9**. Este resultado podría explicarse por la recristalización y el crecimiento de los granos por la concentración de calor generado por la fricción de la herramienta a bajas velocidad de soldadura; mientras que, para mayores Va, no se logra una plastificación suficiente en el material y el resultado, son defectos como los encontrados en 480A. La resistencia mecánica de las uniones soldadas estuvieron por debajo del metal base y de las uniones soldadas por proceso MIG. La eficiencia mecánica de junta máxima lograda fue de 84%.

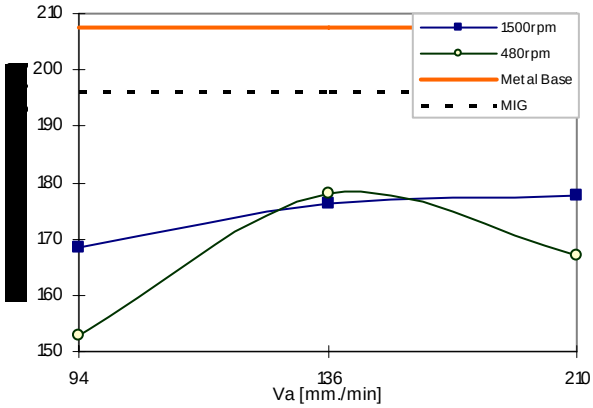


Figura 9. Resistencia Mecánica en Función de V_r y Va para Mg-AZ31B.

El análisis metalográfico mostró claramente definidas las zonas de la unión soldada, como se observa en la **Figura 10**. La zona agitada presentó granos muy finos, respecto a los granos originales, mientras que la ZTMA, presenta las líneas de flujo

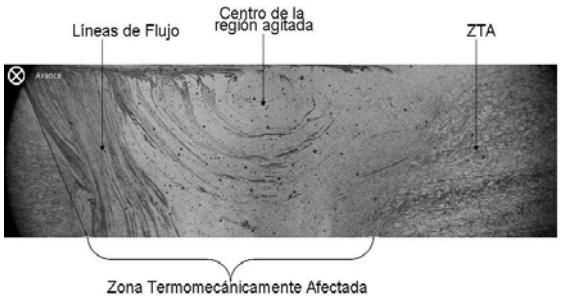


Figura 10. Aspecto de las distintas zonas en la unión soldada de Mg-AZ31B.

que evidencia la deformación ocurrida, y la ZTA presenta crecimiento de los granos. Se encontró una pequeña diferencia en el tamaño de los granos refinados entre los lados de avance y retorno de la zona agitada, como se muestra en la **Figura 11**.

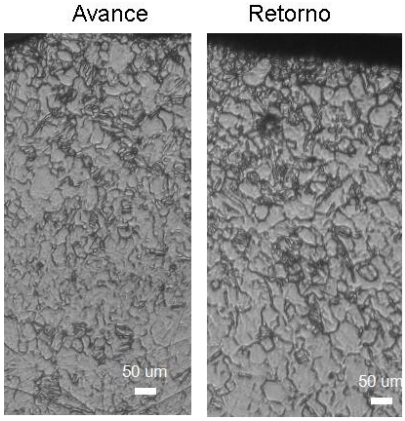


Figura 11. Diferencia en el tamaño de grano según el lado de la junta de Mg-AZ31B.

El análisis microestructural en SEM, mostró la clara diferencia de tamaño de grano en la ZA respecto del metal base, resultado de procesos de recristalización dinámica que sufre el material por efecto de la deformación y la temperatura alcanzada, pasando de un tamaño de grano de aproximadamente 32 µm en el metal base a un tamaño aproximado de 5 µm en la zona del nugget, ZA. Ver **Figura 12**. No se encontró evidencias de precipitado al interior o en los bordes de grano.

4. CONCLUSIONES

- Los resultados positivos obtenidos confirman la factibilidad tecnológica de usar la fresadora universal como equipo base para lograr juntas soldadas sanas y de buenas propiedades mecánicas en ligeras para aplicaciones estructurales.

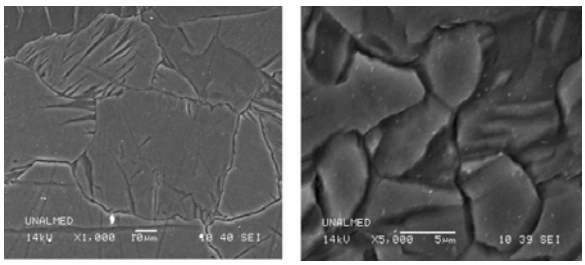


Figura 12. Imágenes SEM de los granos del metal base y la ZA del cordón de Mg-AZ31B. Equipo JEOL GSM 5910.

- Se confirmo que el aumento de la velocidad de soldadura genera un aumento de la resistencia mecánica de la junta soldada. Sin embargo, para las dos aleaciones estudiadas, se obtuvo mayor resistencia mecánica con mayores velocidades de rotación.
- No obstante, haberse logrado altas eficiencias mecánicas de la junta soldada, estas aun se encuentran por debajo de las obtenidas en uniones soldadas por procesos de arco eléctrico.
- Los resultados de calidad y propiedades mecánicas obtenidos con el pin cilíndrico fueron superiores a los del pin cónico, especialmente para la velocidad de rotación de 480 rpm.

5. BIBLIOGRAFIA

[1] MAG TECH 1: Report of a *the global watch mission*. Sept/Oct. 2004.

[2] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, C.J. Dawes, GB Patent Application No. 9125978.8, Dec. 1991.

[3] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, Mater. Sci. Eng. R 50 (2005) 1.

[4] (4) M.Abbasi, A.H. Kokabi, G.H. Daneshi, B. Shalchi, R. Sarrafi, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 1983-1987.

[5] W. Xunhong, W. Kuaishe, Materials Sci. and Engineering A431 (2006) 114 – 117.

[6] S.H.C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa, Scripta Materialia 49 (2003) 161-166.

[7] S. Lim, S. Kim, C-G. Lee, C-D. Yim, S-J. Kim, Metall and Materials Transactions A, Volume 36A, June 2005, 1609 - 1612.

[8] Cabot, P. Moglioni, A., Carella, E. Matéria, Vol 8, Nº 2 (2003) 187- 195

[9] D. Santiago, G. Lombera, A. Cassanelli,

[10] S. Urquiza y L.A. De Vedia, Mecánica Computacional Vol. XXIV, Nov. 2005.

[11] D. Santiago, S. Pereyra, G. Lombera y S. Urquiza, Mecánica Computacional Vol XXV, pp. 2217-2226, Noviembre 2006

[12] C. Meran, Materials and Design xxx (2005) xxx–xxx, accepted 5 May 2005

[13] H. Zhang, S.B. Lin, L. Wu, J.C. Feng, Sh.L. Ma

[14] Amu, M. Franco, F., Ingeniería y Competitividad, V.7, No.2 (2005), pp 29-32.