

## CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LA SOLDADURA MIG, EN LÁMINAS DE ALUMINIO AA-5356

Yovanny Andrade, Yraima Rico Oviedo

Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”

Vicerrectorado Barquisimeto. Departamento de Ingeniería Metalúrgica

[iraima.rico@gmail.com](mailto:iraima.rico@gmail.com), [iraricovi@unexpo.edu.ve](mailto:iraricovi@unexpo.edu.ve)

**RESUMEN:** El proceso de soldadura MIG es usado para las aleaciones de Aluminio AA-5356, la cual es empleada frecuentemente en las industrias Navales, Aeronáuticas y Alimenticias; para la fabricación y/o reparación, de equipos y componentes. Por esto es importante conocer los parámetros de soldadura más adecuados en este proceso y para esta aleación de Aluminio. El objetivo de este trabajo es caracterizar estructuralmente la soldadura realizada mediante el proceso MIG y determinar cómo influye la Energía Neta Aportada (ENA), sobre la estructura, en láminas de Aluminio AA-5356 de 6 mm de espesor. Para esto se realizaron soldaduras a 17, 23 y 26 Voltios usando material de aporte AA-5356, la caracterización estructural se realizó mediante Microscopía Óptica (MO), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y EDS, adicionalmente se realizaron ensayos de dureza Vickers en las láminas soldadas. En el estudio se observaron dendritas equiaxiales en el centro de la soldadura y dendritas columnares en la intercara con el material base, refinación de granos en la zona afectada por el calor, microrrechupes en las zonas interdendríticas y porosidad; también se observaron partículas de (Fe,Mn,Mg)Al homogéneamente dispersas en la soldadura. Se concluyó que los mejores resultados se encontraron en las soldaduras realizadas con 23 V, en cuanto a su penetración, acabado superficial, porosidad y ancho de la soldadura. Los valores de la dureza Vickers fueron más altos en el material base que en el centro de la soldadura, debido a la cantidad de poros y microrrechupes presentes

---

**Palabras clave:** Soldadura MIG, Aluminio AA-5356, Dureza Vickers.

## STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF MIG WELDING IN ALUMINUM FOIL AA-5356

**ABSTRACT:** The MIG welding process is used for aluminum alloys AA-5356, which is frequently used in shipbuilding, aeronautical and food products, to manufacture and / or repair of equipment and components. Therefore it is important to know the most appropriate welding parameters in this process and for this alloy. The aim of this study is to characterize structurally the weld made using the MIG process and determine how it influences the net energy supplied (ENA) on the structure, in sheets AA-5356 Aluminium 6 mm thick. For this welding at 17, 23 and 26 Volts using filler AA-5356, the structural characterization was performed using optical microscopy (OM), Scanning Electron Microscopy (SEM) and EDS, further tests were performed Vickers hardness welded plates. The study observed equiaxed dendrites in the center of the weld and columnar dendrites at the interface with the base material, refining of grains in the heat affected zone, microrrechupes interdendritic areas and porosity, particles were also observed (Fe, Mn, Mg) Al homogeneously dispersed in the weld. It was concluded that the best results were found in welds made with 23 V, in terms of penetration, surface finish, porosity and width of the weld. The Vickers hardness values were higher in the base material in the center of the weld, due to the number of pores and present microrrechupes.

---

**Keywords:** MIG Welding, Aluminum AA-5356, Vickers hardness.

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el Aluminio es uno de los materiales utilizados en estructuras y equipos que requieren generalmente, métodos de ensamble, sujeción y reparación. La soldadura es el procedimiento de unión que se emplea con más frecuencia y en cuanto a los métodos de soldadura, la soldadura por arco con protección gaseosa y electrodo consumible, MIG (Metals Inert Gas), es uno de los más utilizados, ya que presenta una serie de ventajas que mejoran la calidad de las soldaduras, al ser comparadas con otros métodos.

El proceso de soldadura MIG es usado para las aleaciones de Aluminio AA-5356, la cual es empleada frecuentemente en las industrias Navales, Aeronáuticas y Alimenticias; para la fabricación y/o reparación, de equipos y componentes. Por esto es importante conocer los parámetros de soldadura más adecuados en este proceso y para esta aleación de Aluminio. El objetivo de este trabajo es caracterizar estructuralmente la soldadura realizada mediante el proceso MIG y determinar cómo influye la Energía Neta Aportada (ENA), sobre la estructura, en láminas de Aluminio AA-5356 de 6 mm de espesor.

## 2. METODOLOGÍA

Para la realización de las soldaduras, se cortaron láminas de Aluminio AA-5356 de 6 mm de espesor, 20 cm de longitud y 3 cm de ancho, con un bisel de 30° y con raíz de 2 mm; las cuales fueron decapadas con soda cáustica al 6% y ácido nítrico al 2%.

La soldadura MIG se realizó manualmente, con material de aporte de Aluminio AA-5356 y velocidad constante de alimentación. Las soldaduras se realizaron con voltajes de 17, 23 y 26 V, con un equipo de línea de tensión ascendente. Las condiciones de trabajo promedio para cada uno de los voltajes utilizados se muestran en la tabla 1:

**TABLA 1.** Condiciones de trabajo promedio para las soldaduras MIG

| Tensión (V) | Corriente (A) | Tiempo de soldeo (Seg) | Energía Neta Aportada (KJ) |
|-------------|---------------|------------------------|----------------------------|
| 17          | 90            | 20,87                  | 22,6                       |
| 23          | 188           | 14,44                  | 43,6                       |
| 26          | 225           | 13,81                  | 56,8                       |

Se realizó una inspección visual para localizar posibles defectos en las soldaduras. El análisis macroestructural de las soldaduras se realizó en una sección transversal de la misma, revelando la estructura con el reactivo Poulton. El análisis microestructural se realizó mediante Microscopía Óptica (MO), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y la composición química de las fases se determinó mediante Espectroscopia de Energía Dispersiva, la preparación de las muestras se realizó con técnicas tradicionales de desbaste y pulido manual.

Por otra parte se cuantificó el porcentaje de porosidad presente en la soldadura, mediante el software “image-j” y se realizó un análisis estadístico de varianza (ANOVA) para relacionar el % de porosidad con la Energía Neta Aportada (ENA), mediante el software “Statgraphics centurión XV”. Finalmente se realizó un perfil de dureza desde la zona central de la soldadura hasta el metal base, mediante el Ensayo de dureza Vickers, las mediciones se realizaron a 1 mm de distancia entre ellas.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La inspección visual de las soldaduras revelaron defectos, tales como socavaduras, poros, falta de llenado y rechupes, la figura 1 muestra estos defectos para soldaduras realizadas con 23 V (Figura 1.A) y 26 V (Figura 1.B), la socavadura se debe básicamente al alto amperaje generado por la máquina a este voltaje, ocasionando que se funda el material base adyacente a la soldadura; también se observó rechupe en algunas zonas por falta de material de aporte; y porosidad producto de gases atrapados. Al comparar, en la inspección visual, las soldaduras para los tres voltajes utilizados, las láminas soldadas con 23 V presentaron mejores características que las soldadas con 17 V y 26 V.

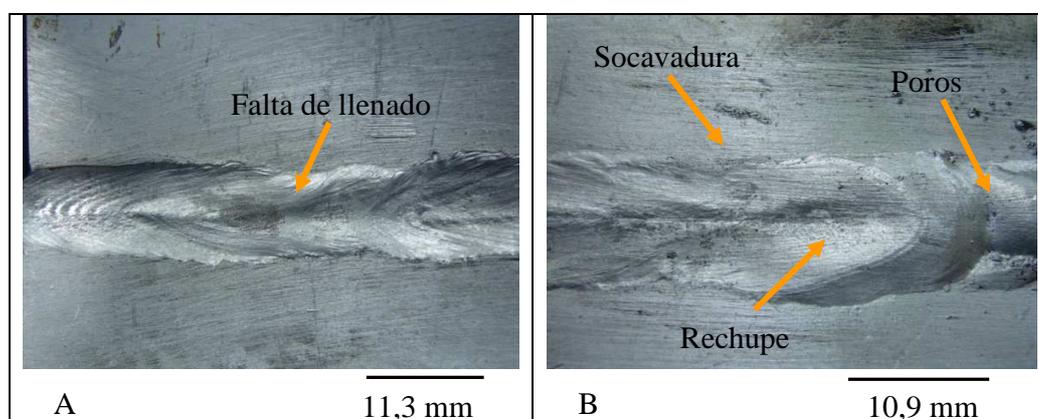


FIGURA 1. Fotografía de la soldadura MIG realizado en una lámina de Aluminio AA-5356 con 23 y 26 V

El análisis macroestructural reveló el ancho de la soldadura, penetración y porosidad, en la figura 2 se muestra la macroestructura de una soldadura realizada con 17 V, se puede observar una corona bastante alta producto de un exceso de material de aporte, debido al bajo voltaje; de igual forma se observa falta de penetración, cabe destacar la presencia de poros distribuidos en toda la soldadura posiblemente a causa de una inadecuada protección del gas protector, esta característica es similar para todas las soldaduras independientemente del voltaje utilizado. Al comparar, las macroestructuras para los tres voltajes utilizados, las láminas soldadas con 23 V presentaron mejor penetración que las soldadas con 17 V y 26 V.

En el análisis microestructural de todas las láminas soldadas (17, 23 y 26 Voltios) se distinguen 3 zonas claramente: La Zona del Metal Base, con una estructura de laminación; la Zona Afectada por el Calor (ZAC), con una estructura equiaxial y la Zona de Fusión la cual presenta una estructura dendrítica columnar en la intercara ZAC/soldadura y dendritas equiaxiales en el centro la soldadura.

Esta diferencia de microestructuras se debe a las diferentes velocidades de enfriamiento entre dichas zonas, lo que genera diversos modos de crecimiento de las intercaras de solidificación, la estructura equiaxial de la ZAC debe básicamente a la recristalización de los granos deformados de laminación que presenta el material base. La figura 3 muestra una micrografía de la zona central de la soldadura, con estructura dendrítica equiaxial.

El tamaño de las dendritas equiaxiales en el centro de la soldadura y la ZAC aumentan conforme aumenta el voltaje en la soldadura, ya que al aumentar el voltaje aumenta proporcionalmente la ENA y la velocidad de enfriamiento disminuye permitiendo así el crecimiento del cristal equiaxial y una mayor ZAC.

Por otra parte el análisis microestructural muestra microrechupes en las zonas interdendríticas, los cuales también aumentan conforme aumenta el voltaje, poros revelados anteriormente en las macroestructuras y precipitados con composición química (Fe,Mg,Mn)Al, homogéneamente dispersos en toda la soldadura, en la figura 4 puede observarse una micrografía electrónica de los precipitados (fase clara) en una matriz rica en Aluminio y un espectro por EDS de los precipitados.

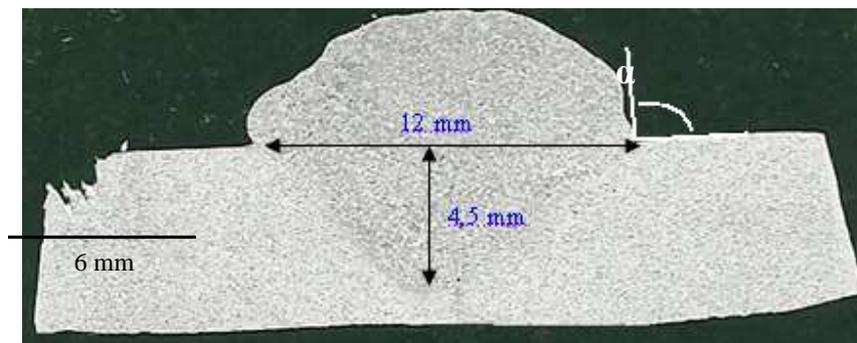


FIGURA 2. Macrografía transversal de soldadura con 17 V, atacada con reactivo Poulton

El porcentaje de porosidad por unidad de área medido, para cada tipo de voltaje utilizado en las soldaduras, puede observarse en la tabla 2, estos resultados se relacionaron con la ENA y se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para conocer la influencia de la ENA en el porcentaje de porosidad, la tabla 3 muestra el ANOVA, donde la razón F, que en este caso es igual a 10,2685; es el cociente entre el estimado del porcentaje de porosidad por unidad de área y el estimado de ENA. Puesto que el valor P de la prueba F es menor que 0,05; existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los 3 valores de la ENA con un nivel del 95,0% de confianza, por lo tanto la Energía Neta Aportada influye de manera significativa en el porcentaje de porosidad de las soldaduras. La figura 5 muestra las medias para cada grupo, se observa una diferencia estadísticamente significativa entre el porcentaje de porosidad presente en las láminas soldadas con ENA de 22,6 KJ y las soldadas con ENA de 43,6 KJ y 56,8 KJ, esto debido a que para pequeños valores de ENA la velocidad de solidificación es relativamente rápida lo que no permite el desalojo de gases que pudiesen estar disueltos en el baño fundido.

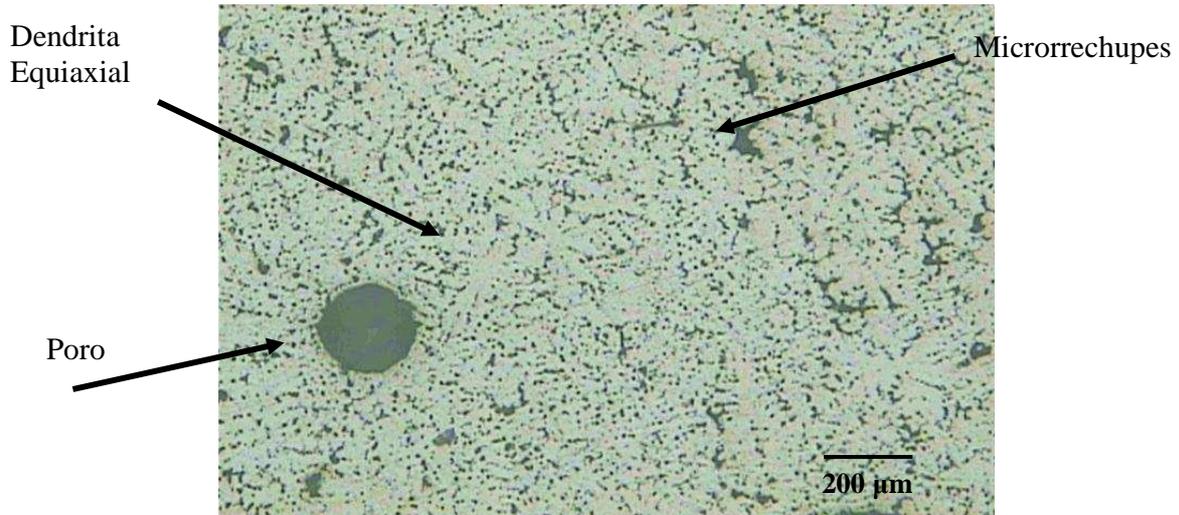


FIGURA 3. Micrografía de la zona central de la soldadura, mostrando un crecimiento dendrítico equiaxial, ataca con Ácido Fluorhídrico al 2 %

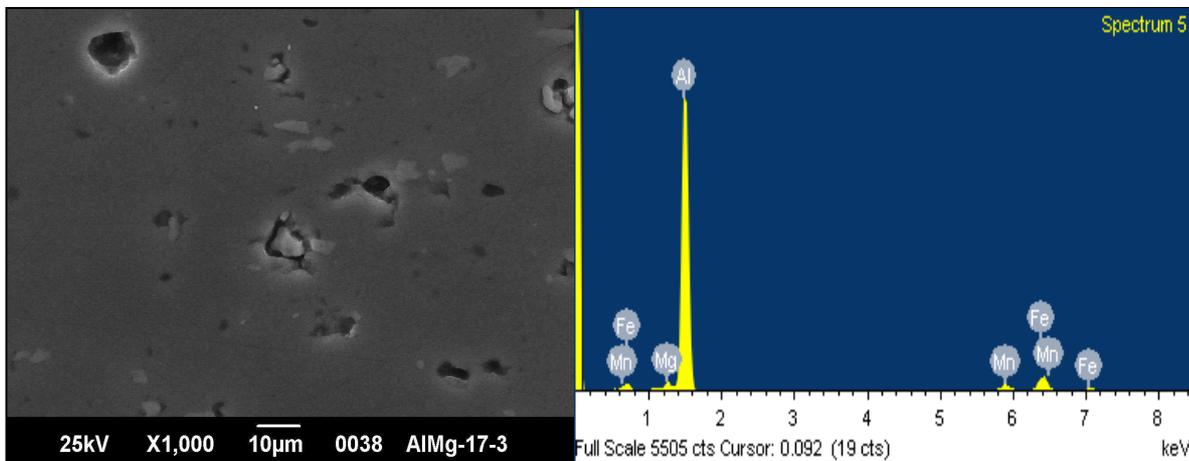


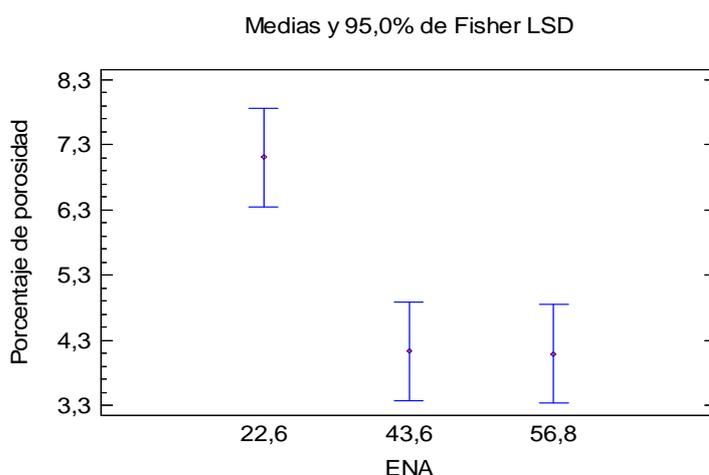
FIGURA 4. Micrografía electrónica de precipitados (Fe,Mg,Mn)Al en la soldadura

**TABLA 2.** Porcentaje de porosidad por unidad de área para cada una de las soldaduras

| 17 V | Campo | % P. Lámina 1 | % P. Lámina 2 | % P. Lámina 3 |
|------|-------|---------------|---------------|---------------|
|      | 1     | 5,229         | 9,532         | 9,917         |
|      | 2     | 0,855         | 5,383         | 5,676         |
|      | 3     | 7,837         | 10,94         | 8,021         |
|      | 4     | 12,195        | 6,262         | 4,295         |
|      | 5     | 11,803        | 9,691         | 3,111         |
| 23 V | Campo | % P. Lámina 1 | % P. Lámina 2 | % P. Lámina 3 |
|      | 1     | 1,111         | 12,146        | 5,194         |
|      | 2     | 1,554         | 7,538         | 5,554         |
|      | 3     | 3,963         | 9,66          | 7,512         |
|      | 4     | 1,413         | 5,514         | 6,307         |
|      | 5     | 0,987         | 3,445         | 8,79          |
| 26 V | Campo | % P. Lámina 1 | % P. Lámina 2 | % P. Lámina 3 |
|      | 1     | 13,39         | 2,801         | 5,905         |
|      | 2     | 4,357         | 0,344         | 5,706         |
|      | 3     | 5,042         | 2,635         | 0,958         |
|      | 4     | 2,173         | 4,403         | 1,696         |
|      | 5     | 2,645         | 5,402         | 1,191         |

**TABLA 3.** ANOVA para el Porcentaje de porosidad por área versus ENA

| Fuente        | Suma de Cuadrados | Gl | Media de cuadrados | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|--------------------|---------|---------|
| % Porosidad   | 179,374           | 2  | 89,6871            | 10,27   | 0,0001  |
| ENA           | 759,877           | 87 | 8,73422            |         |         |
| Total (Corr.) | 939,251           | 89 |                    |         |         |



**FIGURA 5.** Gráfica de Medias de Varianza con 95,0 % de confiabilidad de Fisher

Los perfiles de dureza para cada uno de los voltajes utilizados pueden observarse en la figura 6, los puntos de los extremos (1 y 13) representan la dureza del material base y los puntos centrales (4 - 9) representan la dureza de la soldadura, la dureza del material base es relativamente mayor a la dureza de la soldadura, para todos los voltajes utilizados, la variabilidad de los valores de la dureza no muestran diferencia significativas entre los valores de voltaje.

Se espera que la dureza de una soldadura sea igual o mayor a la dureza del material base; pero, la dureza de los grupos analizados (17, 23 y 26 V) se encuentran por debajo de la dureza del material base, esto debido a la cantidad de poros y microrrechupes presentes en todas las soldaduras.

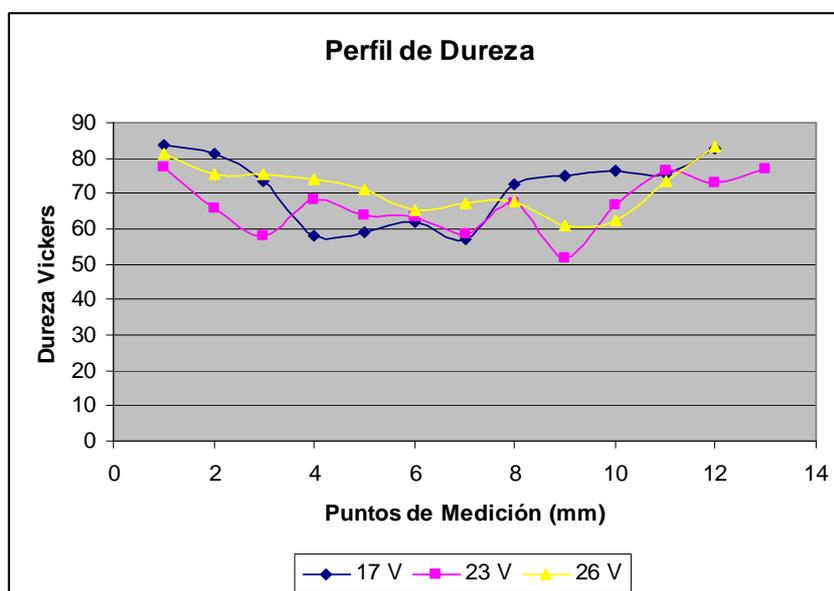


FIGURA 6. Perfiles de Dureza para las soldaduras

#### 4. CONCLUSIONES

- La Energía Neta Aportada influye directamente en la estructura de la soldadura MIG en láminas de Aluminio AA-5356. A mayor ENA mayor es el tamaño de los granos dendríticos en el centro la soldadura y el ancho de la ZAC.
- La soldadura realizada a 23 V (43,6 KJ) obtuvo una mejor penetración, mejor acabado superficial, menor cantidad de defectos superficiales y homogeneidad en la estructura, al ser comparado con los realizados a 17 y 26 Voltios.
- Existe una influencia estadísticamente significativa de la ENA sobre el porcentaje de porosidad por unidad de área presentes en las muestras soldadas.

- Las durezas de las láminas de Aluminio AA-5356, soldadas mediante el proceso MIG con diferentes voltajes (17, 23 y 26 V), no muestran diferencias significativas, sin embargo este resultado pudo ser influenciado por la gran cantidad de poros y microrrechupes presentes en todas las soldaduras.

## REFERENCIAS

- [1] American Welding Society. (1996). Manual de soldadura Tomo I. Editorial McGraw Hill 8<sup>va</sup> edición. México.
- [2] Amú M. y Franco A. (2009). “Microestructura y propiedades mecánicas en la zona afectada por el calor de la unión de la aleación 6261-T5. Publicado en el “Volumen Suplemento” S1 de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales (RLMM); Este suplemento recoge las memorias del congreso “X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)” celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008).
- [3] Barrena M. (2000). “Soldadura por fusión de materiales compuesto de matriz de Aluminio”. Tesis doctoral para Doctor en Ciencias Químicas. Universidad Complutense, Facultad de Ciencias Químicas. Madrid, España.
- [4] Calderón X. (2005). “Caracterización de la microestructura de una unión de lámina de Aluminio comercial AA-6063 soldadas mediante el proceso TIG”. Trabajo de grado para Ingeniería Metalúrgica. UNEXPO. Barquisimeto, Venezuela.
- [5] Chaviel R. (2005). “Comparación de procesos de soldadura MIG y TIG para uniones de láminas de aluminio AA-5083”. Trabajo de grado para Ingeniería Metalúrgica. UNEXPO. Barquisimeto, Venezuela.
- [6] Giachino J. y Week W. (1981). Técnica y práctica de la soldadura. Editorial Reverté. Barcelona, España.
- [7] Gómez D. (2009). “Estudio de la estructura y propiedades mecánica en cordones de soldadura en lámina de Aluminio AA-3003, variando la intensidad de corriente”. Trabajo de grado para Ingeniería Metalúrgica. UNEXPO. Barquisimeto, Venezuela.
- [8] Herenguel J. (1976). Metalurgia Especial. Ediciones Espartero. España.
- [9] Lancaster L.F. (1972). Tratado de soldadura. Editorial Tecnos S.A. Madrid, España.

- [10] Metal Handbook. (1993). Alloys Phase Diagrams. Volumen 3. 8<sup>va</sup> Edición U.S.A.
- [11] Metal Handbook. (1993). Atlas of microstructures of industrial alloys. Volumen 7. 8<sup>va</sup> Edición. U.S.A.
- [12] Metal Handbook. (1993). Welding, Brazing and Soldering. Volumen 6. 8<sup>va</sup> Edición U.S.A.
- [13] Michele M. (1998). “Weldability of dissimilar 5000 and 6000 series Aluminium Alloys combinations”. Tesis para optar a Maestro en Ciencias. The Ohio State University. Ohio, U.S.A.
- [14] Mondolfo L.F. (1976). Aluminium Alloys Structure and Properties. Editorial Butterworth. Londres, Inglaterra.
- [15] Smith W. (1998). Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los materiales. Editorial McGraw Hill 3<sup>ra</sup> edición. Madrid, España.
- [16] [Universidad Austral de Chile (2007). “Aplicación de la soldadura en estructuras de Aluminio” [documento en línea] Disponible:  
<http://www.scribd.com/doc/17688251/Soldadura-en-Estructuras-de-Aluminio>