

Caracterización del Aluminio 5083 H116 soldado con el Proceso GMAW Pulsado

Alfredo Morales^{1*}, Robert Muñoz^{2*}, Alfonso Patarroyo^{3*}, Fernando Rojas^{4*}, Diana Aragón⁵

¹ Ingeniero Metalúrgico, Estudiante de Doctorado en Ingeniería Ciencia y Tecnología de Materiales Universidad Nacional de Colombia. Gestor del Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación COTECMAR. Bogotá, D.C. - Colombia. * amorales@cotecmar.com

² Estudiante de Ingeniería Mecánica Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, D.C. - Colombia. * rmunoz@unal.edu.co

³ Ingeniero Metalúrgico, Asesor del Centro de Materiales y Ensayos SENA Regional Bogotá. Bogotá, D.C. - Colombia. * apatarroyo@misena.edu.co

⁴ Ingeniero Metalúrgico, Estudiante de Doctorado en Ingeniería Ciencia y Tecnología de Materiales Universidad Nacional de Colombia. Docente Investigador Universidad Libre de Colombia. Bogotá, D.C. - Colombia. * hectorf.rojasm@unilibrebog.edu.co

⁵ Ingeniera de Sistemas. Gerente Ingenieros A&R Consultores S.A.S. Bogotá, D.C. - Colombia.

Fecha de recepción del artículo: 08/08/2012 Fecha de aceptación del artículo: 30/08/2012

Resumen

Esta investigación se fundamentó en el análisis de la soldabilidad de las uniones de aluminio 5083 H116 con material de aporte ER 5183, según clasificación de la AWS 5.10, mediante el proceso GMAW PULSADO, con el objeto de determinar las condiciones de la zona afectada por el calor ZAC en el material base, dependiendo del calor introducido con diferentes equipos disponibles en Colombia. Las variables consideradas dentro del presente estudio fueron: posiciones de soldadura (horizontal), tipo de uniones (tope y filete), parámetros de los equipos (voltaje, amperaje, velocidad de alimentación del aporte, velocidad avance), y gas de protección (Argón, Ar, 100%). Se utilizaron técnicas de ensayos no destructivos y destructivos para la caracterización de las discontinuidades encontradas, así como los criterios de aceptación del código AWS D1.2 (STRUCTURAL WELDING CODE - ALUMINUM) del AWS (AMERICAN WELDING SOCIETY). Como producto de la investigación se obtuvieron las condiciones para la aplicación del material ER 5183, sobre la aleación de aluminio 5083 H116 como material base soportados por los documentos técnicos como el WPS (WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS) y PQR (Procedure Qualification Record), que sustentan la soldadura de aluminio sin

precalentamiento, para su implementación en el astillero de COTECMAR.

Palabras clave

Soldabilidad, GMAW Pulsado, ZAC, Discontinuidades, Aluminio 5083 H116.

Abstract

This research was based on the analysis of the weldability of aluminum joints 5083 H116, with filler AWS 5.10 ER 5183 by GMAW PULSED process to determine the conditions of the heat-affected zone in the base material, depending on the heat input for the process with different technologies available in Colombia. The variables considered within this study were: welding positions (horizontal), type of welded joints (butt and fillet), and parameters for welding equipment (voltage, current, speed, power supply, speed development), and protective gas used (Argon, 100%). Non-destructive and destructive testing techniques were used to characterize the discontinuities found and the criteria to accept the AWS D1.2 code (STRUCTURAL WELDING CODE-ALUMINUM by the AMERICAN WELDING SOCIETY). As a result, the investigation yielded the conditions for the application of filler material (ER 5183) on base material (5083 H116), supported

by Welding Procedure Specifications Documents (WPS) and Procedure Qualification Record (PQR) to implement in aluminum welding at the COTECMAR shipyard.

Keywords

Weldability, GMAW Pulsed, HAZ, Discontinuities, Aluminum 5083 H116

Introducción

Según Tabares, la zona afectada por el calor (ZAC), es la sección en el material base en el que las propiedades mecánicas son afectadas por el arco durante el proceso de soldeo en cualquier material metálico [1]. Dependiendo de la cantidad de calor de entrada, la magnitud de la ZAC aumentará o disminuirá conforme la temperatura en el material base, sea mayor o menor [2]. En las aleaciones de aluminio, las propiedades mecánicas son seriamente disminuidas por el efecto del calor introducido por el proceso de soldadura; es más crítico para las aleaciones de la serie 5083, que son aleaciones no tratables térmicamente y comúnmente usadas en la industria marítima, y cuyas propiedades mecánicas son atribuidas a su elemento de aleación principal, el magnesio, y a los esfuerzos residuales generados por un endurecimiento dado por trabajo en frío [3]. La documentación del proceso de soldadura por arco metálico con protección gaseosa (GMAW), con transferencia mediante spray pulsado, es escasa para este tipo de aleaciones en aplicaciones con aluminios navales [4]. La generación de poros y discontinuidades se puede atribuir a la utilización de las mezclas gaseosas, a la falta de personal técnico calificado como soldador en este tipo de materiales y a la no actualización de las normas de competencias laborales para aplicaciones con la tecnología de GMAW - Pulsado.

El aluminio es un material con excelente propiedad mecánica y resistente a la corrosión. Con su implementación en la industria naval, hay disminución en el consumo de combustible y la inversión en mantenimiento de las embarcaciones [5].

El proceso de soldadura por arco metálico con protección gaseosa (GMAW), es un proceso semiautomático o automático, donde un arco eléctrico es mantenido entre un alambre sólido que funciona como electrodo continuo y la pieza de trabajo [6]. Este proceso tiene diferentes modos de transferencia de masa, *corto circuito, globular y spray* [7]. Los equipos de soldadura de última generación enfocan sus tecnologías en el modo de transferencia de spray pulsado, con ventajas en la aplicación en todas las posiciones de soldeo, sin salpicadura. La industria de la construcción naval colombiana viene haciendo uso de materiales de alta resistencia, como las aleaciones de aluminio - magnesio (5083 H116), soldada con material de aporte ER 5183 AWS 5.10 y gas de protección (Argón, Ar, 100%) que cumplen con los requisitos de resistencia a la tracción como se especifican en los códigos [5].

Las designaciones de los aluminios y de sus aleaciones se basan en la calidad de productos forjados o productos fundidos (moldeados) [8].

La composición química de las aleaciones de aluminio debe satisfacer los requisitos para la construcción de cascos y estructura marinas de Si 0,4%, Fe 0,4%, Cu 0,1%, Mn 0,4-1,0%, Mg 4,0-4,9%, Cr 0,05-0,25%, Zn 0,25%, Ti 0,15%, otros elementos 0,05% y la base en Al. En cuanto a las propiedades mecánicas, estas aleaciones deben cumplir con: un esfuerzo de fluencia de 215 N/mm², un esfuerzo de tensión de 305 N/mm² y una elongación del 10% para espesores entre 3 y 50 mm. [9]. Para soldar aleaciones de aluminio, se recomienda que las juntas sean placas de aleación 5083 H116 de 6,7mm de espesor [10]. Los consumibles para soldar estas aleaciones de aluminio tienen propiedades mecánicas en función del esfuerzo cortante de 18,5 KSI (128MPa), longitudinalmente y transversalmente de 28,0 KSI (193 MPa) [11]. Las variables esenciales del proceso GMAW son: corriente de soldadura, tensión de arco, longitud libre del electrodo (Stick-out), polaridad, velocidad de avance, diámetro del electrodo, orientación del electrodo y gases de protección que pueden ser 100% Ar, 35% Ar-65% He y 25% Ar-75% He [12]. Las ventajas más importantes para el proceso

GMAW por la técnica Spray Pulsado son: permite la aplicación en todas posiciones sin salpicadura, se utiliza en espesores que van desde 3mm a 50mm; la tecnología es versátil y programable y se puede soldar con materiales de aportación mayores a 0,9mm. Una de sus desventajas es el alto costo inicial del equipo [13].

La soldadura ER 5183 es de muy buena fluidez, bajo punto de fusión (punto eutectoide) y ampliamente utilizada en la industria astillera. Las características del alambre son similares a las del material base con un esfuerzo de fluencia de 140 MPa y esfuerzo de tensión de 300 MPa y una elongación del 20%, con puntos de fusión que van de 574 a 638°C [14]. En los procedimientos de soldadura por arco con protección gaseosa, el gas protector puede tener una gran influencia sobre las propiedades del metal depositado [15]. Las uniones soldadas de aluminio han sido ampliamente estudiadas desde hace años y muchos investigadores se han dedicado al estudio del fenómeno metalúrgico del baño fundido [16]; algunos netamente al cordón de soldadura [17], otros han caracterizado las propiedades mecánicas [18]. No obstante, son pocos los trabajos relativos a la evolución de la zona afectada por el Calor ZAC [19] y específicamente para este tipo de aleaciones [20]. También hay otros investigadores que se han dedicado al análisis de la evolución de la energía y la temperatura de disolución de los Gases de Protección, en función del espesor del material base [21].

Metodología

En primera instancia, se consideró un experimento de tipo comparativo que implica establecer el conjunto de circunstancias [22] propias del proceso de soldadura, tales como: tipo de gases, número de cupones, número de probetas, diseño de junta y material base. Por ende, la metodología llevada a cabo durante la investigación, consistió en la búsqueda y selección de fuentes de alimentación para soldeo con GMAW PULSADO, obtención de las probetas para la caracterización química y mecánica del material base, diseño de las juntas acorde al código AWS D1.2, codificación de las

juntas y equipos según variables seleccionadas, elaboración de la matriz de codificación, proceso de aseguramiento de la trazabilidad de los materiales, preparación y mecanizado las juntas, soldeo de las juntas, obtención de cupones de prueba, verificación de las discontinuidades en los cupones por medio de las técnicas END inspección visual y líquidos penetrantes, determinación del número de probetas a obtener por cupón soldado según código AWS D1.2, marcación de los cupones para obtención de probetas, corte de los cupones, preparación y mecanizado de probetas, realización de ensayos mecánicos, obtención y análisis de resultados.

Resultados

El análisis espectrométrico realizado al material base en el laboratorio, generó resultados similares a los referenciados por la IACS-W25; se presentó una disminución en el contenido Mg y el Cr no pudo ser registrado por el equipo (ver Tabla 1).

Tabla 1. Resultados de la Composición Química.

Composición química de laboratorio	
Elemento	% peso
Si	0,556
Fe	0,283
Cu	0,0312
Mn	0,5322
Mg	C,001
Cr	---
Zn	0,001
Ti	0,0138
Al	99,077
Otros elementos	0,0037

Fuente: Laboratorio de Espectrometría - Centro de Materiales y Ensayos, SENA.

Los resultados de las propiedades mecánicas del material de aporte se muestran en la Tablas 2 y 3 y en los Gráficos 2 y 3 para las tecnologías Y y Z respectivamente; los valores obtenidos fueron mayores a los esfuerzos establecidos por la IACS-W25.

Tabla 2. Características mecánicas del material de aporte utilizado con la tecnología Y para la junta soldada a tope

Características mecánicas	
Esfuerzo de fluencia (MPa)	213,745
Esfuerzo de rotura (MPa)	303,38

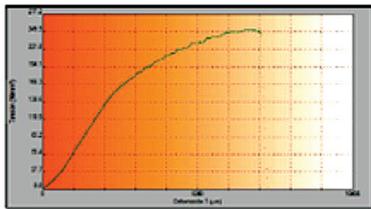


Gráfico 2. Curva esfuerzo de formación del material de aporte utilizado con la tecnología Y para la junta soldada a tope.

Fuente: Laboratorio de Materiales, Universidad Los Libertadores.

Tabla 3. Características mecánicas del material de aporte utilizado con la tecnología Z para la junta soldada a tope.

Características mecánicas	
Esfuerzo de fluencia (MPa)	166,85
Esfuerzo de rotura (MPa)	243,815

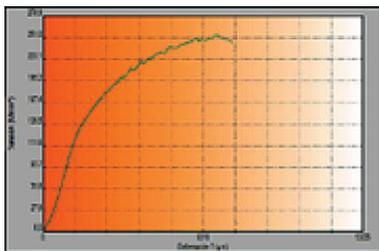


Gráfico 3. Curva esfuerzo de formación del material de aporte utilizado con la tecnología Z de la junta soldada a tope.

Fuente: Laboratorio de Materiales, Universidad Los Libertadores.

Para los diseños de juntas a tope y en filete se trabajó acorde con los parámetros establecidos en los Diagramas 1 y 2; esto permitió la generación de una matriz de codificación (ver Tabla 4), según el tipo de juntas, las posiciones de soldeo de acuerdo con las tecnologías utilizadas (Y, Z).

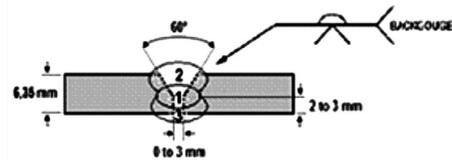


Diagrama 1. Diseño de la Junta a Tope.

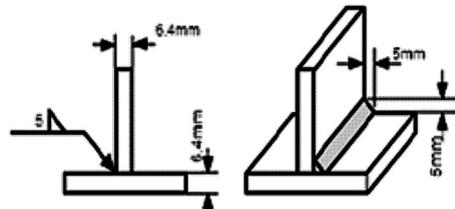


Diagrama 2. Diseño de la Junta en Filete.

Fuente: [23].

Los criterios de aceptación y rechazo aplicados en las técnicas de inspección por ensayos no destructivos como inspección visual y líquidos penetrantes, fueron según AWS D1.2, donde se evaluaron las discontinuidades superficiales.

Se aplicaron a los cupones líquidos penetrantes fluorescentes como técnica de respaldo y la Foto 1 muestra para una junta en filete el socavado predominante de 1mm de profundidad admisible dentro de los criterios del código.



Foto 1. Resultados Técnica Líquidos Penetrantes Juntas en Filete.

Fuente: Los autores del proyecto.

Tabla 4. Matriz de codificación

Material base:	Material de aporte:			Gas de protección: 100% Argón			
Aluminio AA5083 H116	ER 5183						
Espesor de lámina: ¼”	Proceso: GMAW – Pulsado						
Tipo de junta	TOPE			FILETE			NUMERO DE CUPONES
Posición	2G	3G	4G	2F	3F	4F	
Equipo							
Tecnología Y	M2G2	M3G2	M4G2	M2F2	M3F2	M4F2	6
Tecnología Z	F2G2	F3G2	F4G2	F2F2	F3F2	F4F2	6

Fuente: Los autores del proyecto.

Para la realización de las pruebas mecánicas, los cupones se dimensionaron y trazaron acorde con la AWS D1.2; los Diagramas 3 y 4 muestran los diseños de los cupones para la obtención de las probetas y su posterior mecanizado y ensayo tanto de doblez para las juntas a tope, como de fractura para las juntas en filete.

3.1 Macrografías

Las Macrografías 1, 2 y 3, muestran los puntos de observación de las probetas obtenidas del cupón para la tecnología Z, se observa el material base, la zona afectada por el calor (ZAC) y el material de aporte; se aprecian también las secciones del macroataque, según lo indica el diseño.

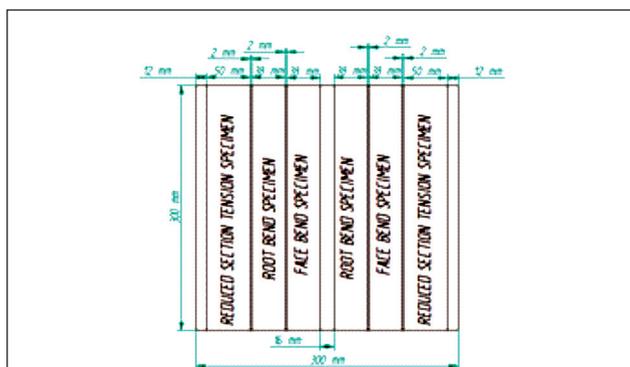


Diagrama 3. Dimensionamiento para probetas – Juntas a Tope.

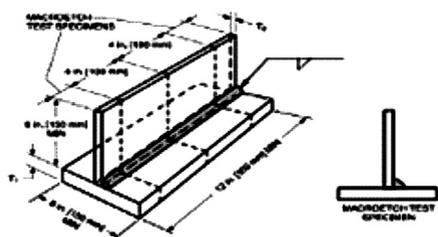
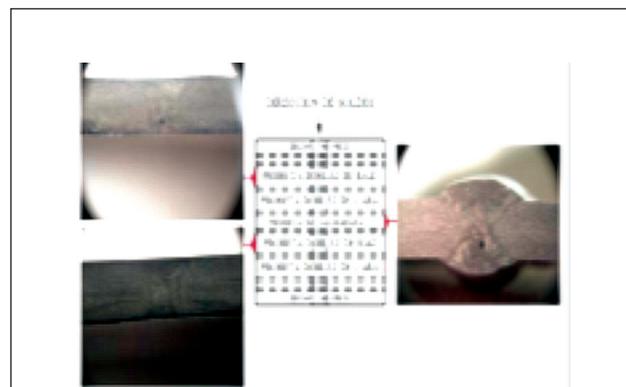
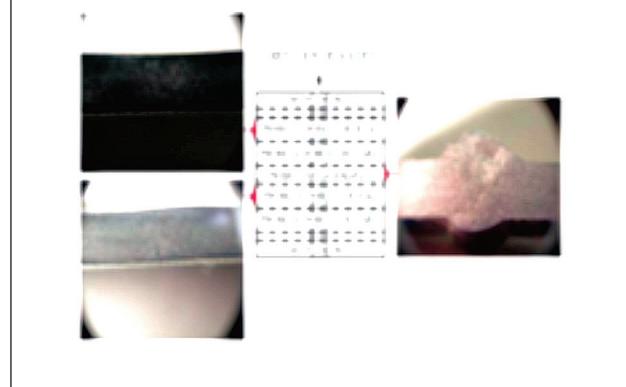


Diagrama 4. Dimensionamiento para probetas – Juntas en Filete.

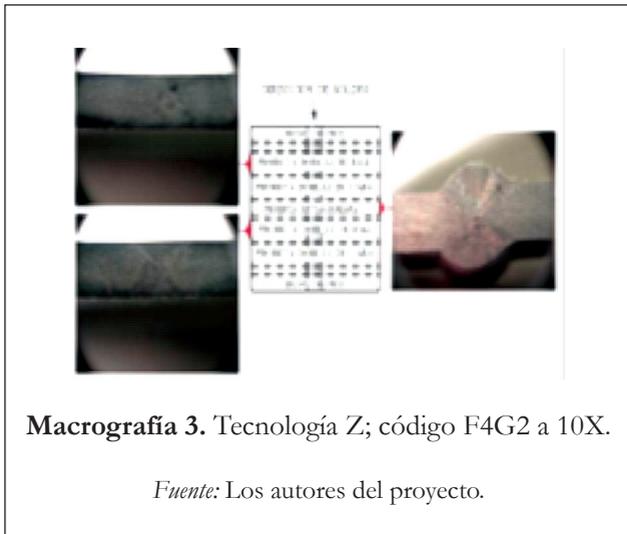
Fuente: [23].



Macrografía 1. Tecnología Z; código F2G2 a 10X.

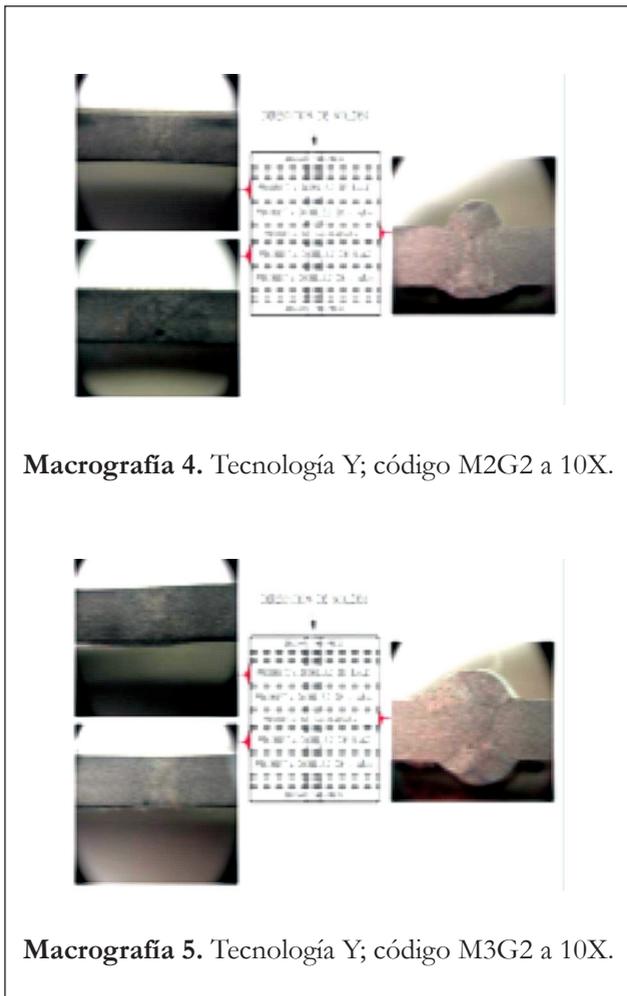


Macrografía 2. Tecnología Z; código F3G2 a 10X.



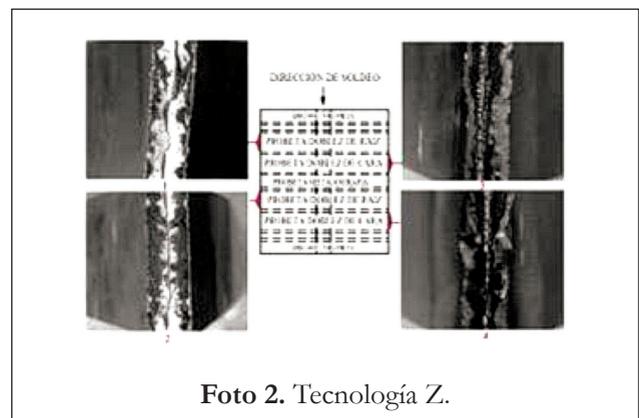
Las Macrografías 4, 5 y 6 corresponden a la tecnología **Y** con las mismas características enunciadas anteriormente.

Cabe anotar que para el macroataque de todas las probetas, se utilizó una solución de 200cc de HNO_3 y 50cc de HF a temperatura ambiente, por un tiempo de 60 s, para establecer la disolución de los precipitados y el reconocimiento de las discontinuidades como: óxidos, grietas e inclusiones.



3.2 Ensayo de doblez

El ensayo de doblez, para las juntas a tope, se realizó una vez verificadas las condiciones macroscópicas de estas, resaltando un comportamiento de fractura frágil en todas las probetas soldadas con la tecnología Z, con una ruptura total según se muestra en la Foto 2. Por su parte, para las aplicaciones con la tecnología Y, la Foto 3 evidencia la generación de grietas transversales por la cara de la raíz.



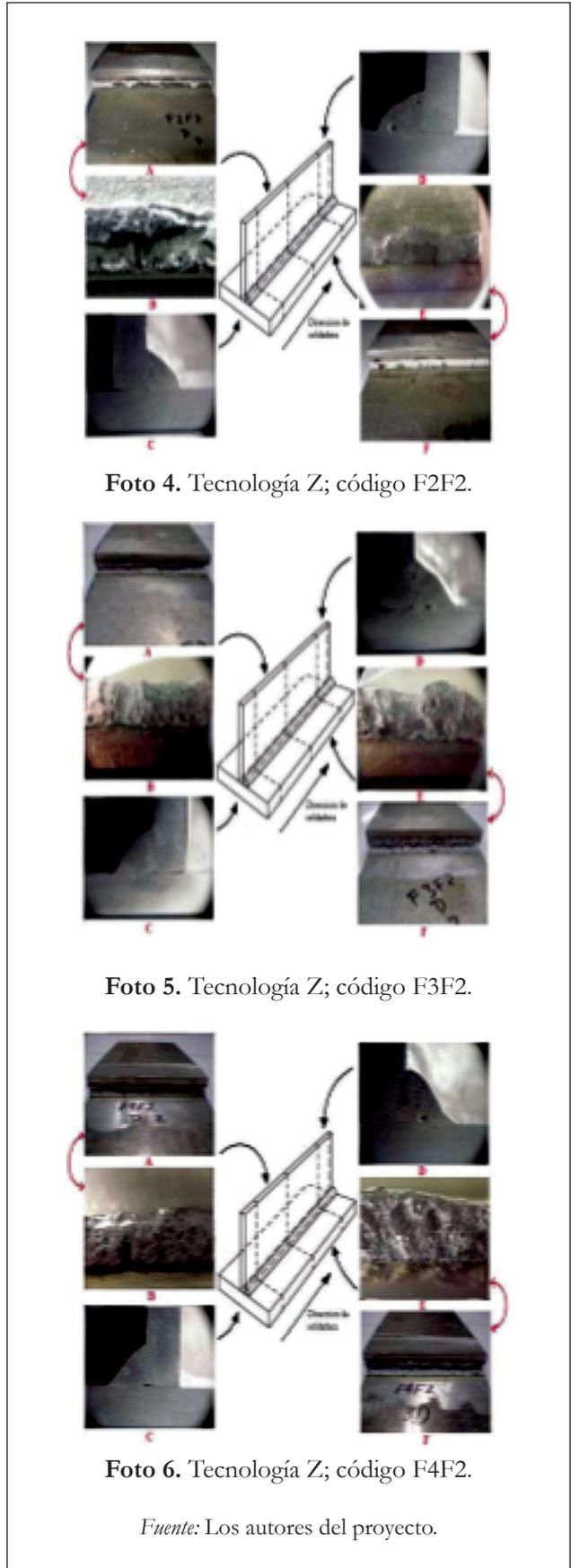
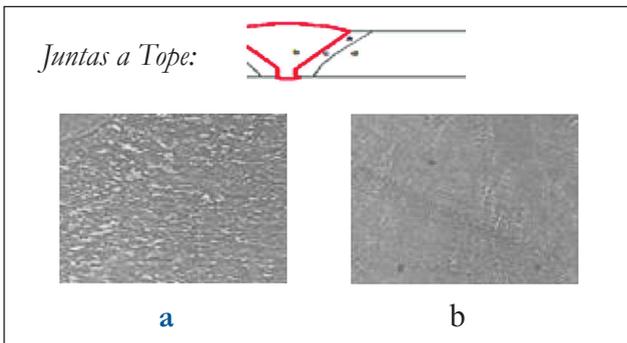


3.3 Ensayo de Fractura

El ensayo de fractura se practicó a los cupones soldados en filete, cuyo comportamiento para toda la aplicación con la tecnología Z, fue generación de poros y falta de fusión, tal como muestran las Fotos 4, 5 y 6. La tecnología Y presenta en las Fotos 7, 8 y 9, una menor generación de poros y falta de fusión.

3.4 Ensayo Metalográfico

Las micrografías 1, 2 y 3, presentan los resultados del ensayo metalográfico para el diseño de las juntas a tope y las micrografías 4, 5 y 6, para las juntas en T. Los puntos designados como “a” y “c” en el diseño, corresponden a la ZAC. El punto “a” es evaluado en la parte superior de esta zona y el punto “c” en la parte inferior. El punto “b” es valorado en el material de aporte y el punto “d” para el material base. Se puede apreciar en las micrografías “c”, la confirmación de discontinuidades como poros y falta de fusión en las juntas en T.



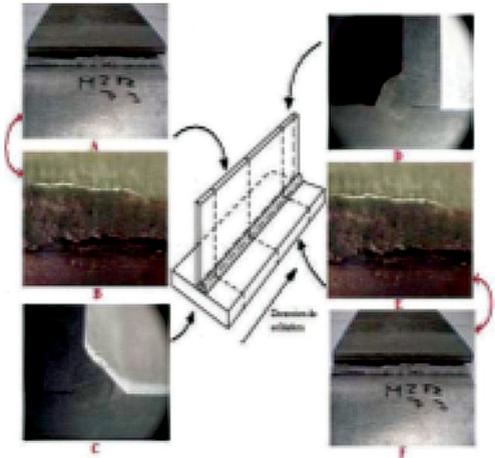


Foto 7. Tecnología Y; código M2F2.

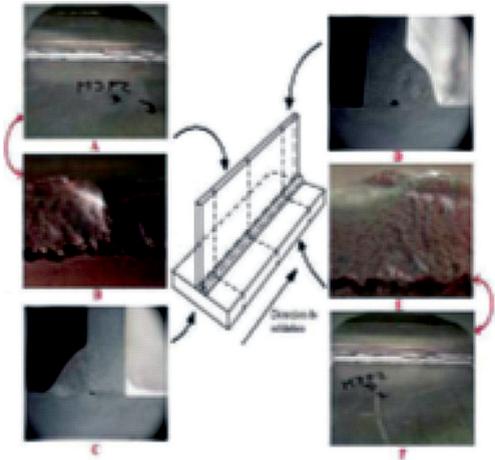


Foto 8. Tecnología Y; código M3F2.

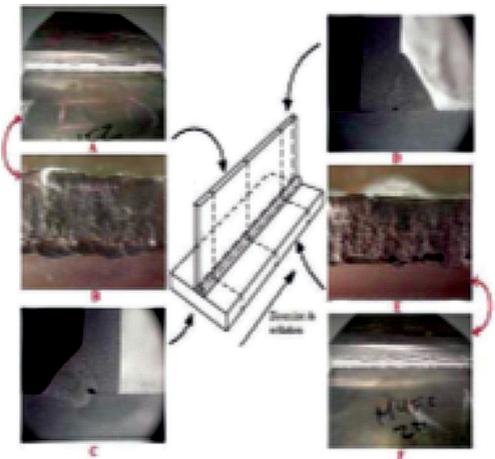
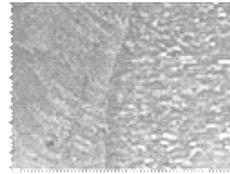
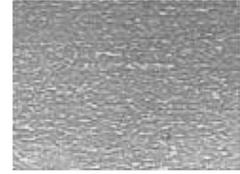


Foto 9. Tecnología Y; código M4F2.

Fuente: Los autores del proyecto.

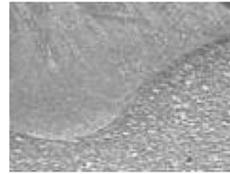


c

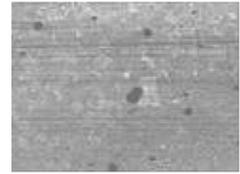


d

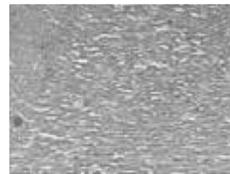
Micrografía 1. Metalografías cupón a tope M2G2 a 100X.



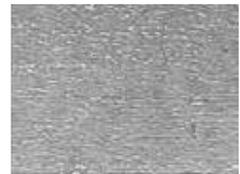
a



b



c

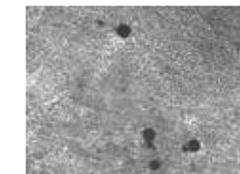


d

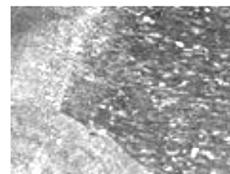
Micrografía 2. Metalografías cupón a tope M3G2 a 100X.



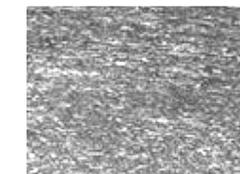
a



b



c

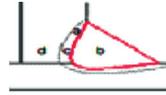


d

Micrografía 3. Metalografías cupón a tope M4G2 a 100X.

Fuente: Los autores del proyecto.

Juntas en T (Soldadura de Filete):



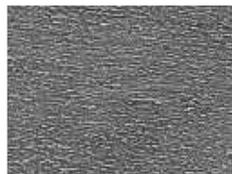
a



b

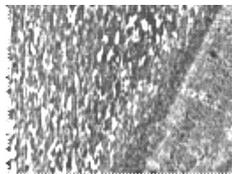


c



d

Micrografía 4. Metalografías cupón en T M2F2 a 100X.



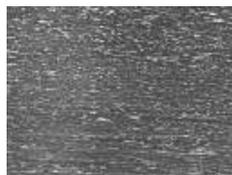
a



b

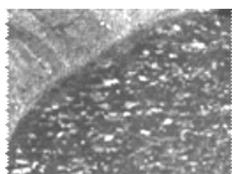


c



d

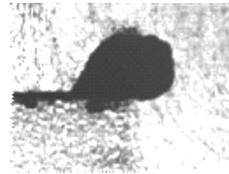
Micrografía 5. Metalografías cupón en T M3F2 a 100X.



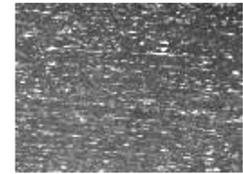
a



b



c



d

Micrografía 6. Metalografías cupón en T M4F2 a 100X.

Fuente: Los autores del proyecto

Ensayo de Dureza

Los Gráficos 4 y 5, corresponden a los perfiles de dureza para los diseños de juntas a tope con las tecnologías Z y Y respectivamente, observándose una asimetría en los perfiles de dureza para la tecnología Z, mientras que para la tecnología Y, la tendencia de estos es simétrica. El mismo comportamiento se aprecia en los Gráficos 6 y 7, correspondientes a los perfiles de dureza de las juntas en T.

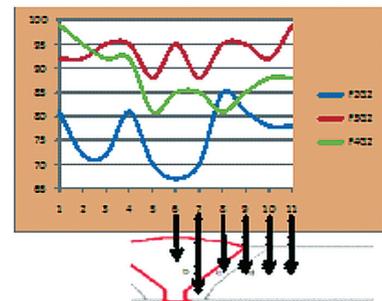


Gráfico 4 Perfil de Dureza Tecnología Z.

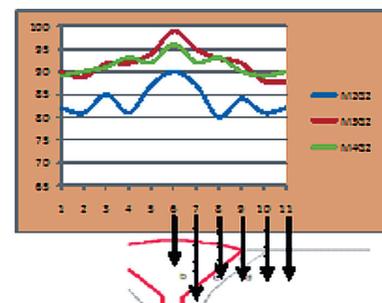


Gráfico 5 Perfil de Dureza Tecnología Y.

Fuente: Los autores del proyecto.

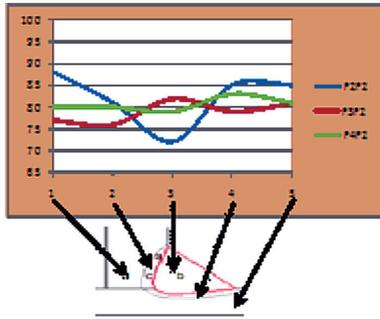


Gráfico 6 Perfil de Dureza Tecnología Z.

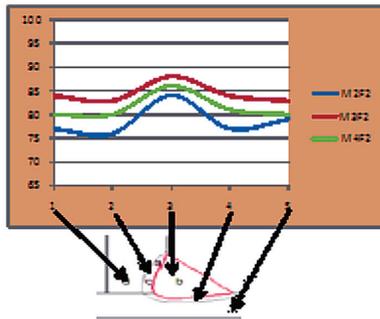


Gráfico 7 Perfil de Dureza Tecnología Y.

Fuente: Los autores del proyecto.

Conclusiones

- Se seleccionaron dos tecnologías de aplicación GMAW PULSADO, las cuales se designaron como Y y Z respectivamente; estas se aplicaron a diseños en juntas a tope y en T, con posiciones de soldeo 2G, 3G y 4G para tope y 2F, 3F y 4F para T.
- Se configuró la matriz de codificación para asegurar la trazabilidad de materiales en la tabla 4, con los parámetros de Argón 100%, como mezcla gaseosa para esta primera fase.
- La caracterización preliminar al material base y de aporte con las pruebas de espectrometría y mecánicas, permitieron establecer las comparaciones con las referencias teóricas consideradas. Los valores de las pruebas mecánicas para el ensayo de tensión de las juntas a tope, muestran un incremento del 28,1% en el esfuerzo de fluencia y del 24,5% para el esfuerzo de ruptura en los cupones soldados con la tecnología Y, frente a la tecnología Z.
- Con las técnicas de inspección visual y líquidos penetrantes, se evaluaron las discontinuidades superficiales de los cupones.
- El macroataque mostró, en las juntas soldadas, las zonas del material base; zona afectada por el calor ZAC y material de aporte.
- El ensayo de doblez y fractura, permitieron evidenciar que las aplicaciones realizadas con la tecnología Z, presentaron comportamientos mecánicos inferiores a la tecnología Y.
- El análisis metalográfico mostró, con más detalle, la microestructura de las zonas de las juntas soldadas y confirmó discontinuidades como poros y falta de fusión. Este procedimiento se realizó con un microscopio óptico metalográfico conectado a un analizador de imágenes con magnificación a 100x en niveles de gris, debido a que el interés de la investigación era el de determinar las condiciones globales del material de aporte, frente al material base. En las micrografías se alcanzan a apreciar zonas dendríticas (puntos blancos) en la ZAC, con orientaciones anisotrópicas debido a las posibles fases presentes como Si, Mg_2Si , $Fe_2Si_2Al_9$ y Fe_3SiAl_{12} , dentro de una matriz de solución sólida rica en aluminio, según los resultados del análisis químico.
- En los perfiles de dureza, la simetría de los puntos lo presenta la tecnología Y, mientras que la tecnología Z muestra irregularidad. La magnitud de dureza más alta la presentan los cupones soldados con la tecnología Y, en las designaciones F3G2 con 95 HB y F3F2 con 82 HB en el material de aporte, mientras que para las designaciones M3G2 y M3F2, fueron de 99HB y 88 HB respectivamente.
- Se recomienda analizar el comportamiento de este material con otra mezcla gaseosa como Ar 25%, He 75%; Ar 50%, He 50% y probar con otras tecnologías en una segunda fase de la investigación.
- Es importante la capacitación del personal técnico para este proceso y transferir los conocimientos al astillero de Cotecmar en Cartagena.

Referencias

1. Tabares, E. (2001). *Ingeniería de soldadura*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia - Departamento de Ingeniería Mecánica.
2. Hernández, G. (2003). *Manual del soldador*. Asociación Española de Soldadura y Tecnología de Unión.
3. Journal of achievements in materials and manufacturing engineering. Arc voltage behavior of one drop per pulse mode in GMAW Pulsed. Vol. 17- Issue 1-2. July-August. 2006.
4. *Tecnología en soldadura*. Disponible en: www.sunarc.com, 2006.
5. American Bureau of Shipping. Requirements for materials and welding. Part 2. Aluminum.
6. Alu-stock S.A. (2007). *El libro del aluminio, industria y arquitectura*. Capítulo 10. Información técnica.
7. Howard, C. (1981). *Manual de soldadura moderna*. Tomo 1, segunda edición. Prentice Hall Hispanoamericana S.A.
8. Mangonon, L. (2001). *Ciencia de materiales. selección y diseño*. Pat L. Prentice Hall.
9. IACS "International Association of Classification Societies Section W25".
10. ABS (American Bureau of Shipping). Part 2 Appendix 2/E.
11. *ASM Metals HandBook*. Volume 6. Welding, brazing, and soldering, pág. 1801.
12. Abello, L. (2008). *Gases de protección para la soldadura*.
13. Guardia, J. (2003). *Procesos de soldadura por arco pulsado*. EXSA - OERLIKON.
14. <http://spanish.alibaba.com/product-gs/aluminum-wire-er5183-html>.
15. Giachino, J. and Weeks W. (2007). *Técnica y práctica de la soldadura*.
16. Hermann R. (et al) (1996). *Liquation cracking in aluminium alloy welds*. *Material science and engineering A*. pp 247-255.
17. Hepples, W. (et al). (1992). Microstructural characterization of white zones in weldable 7000 series alloys. *Journal of Materials Science*. Vol. 27, Iss 21, pp 5720-5725.
18. Debbouz, O. (et al) (1997). Mechanical characterization by dynamical tensile loading of 20127 aluminium alloy joints welded by diffusion bonding. New results and SEM observations of the failure surfaces. *Journal of Materials Science*. Vol. 32, pp. 475-482.
19. Bloem, C. (et al) (2000). Estudio microestructural y de resistencias de uniones soldadas de aleación AW 7020 por procedimiento MIG en función de la preparación de bordes. *Revista Metalurgia*. Vol. 36 pág 33-30.
20. *Revista Ciencia e Ingeniería*. Vol. 22, No. 2.2000.
21. <http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/ciencia-ingenieria/article/viewFile/>
22. Huehl, R. (2008). *Diseño de experimentos*. Segunda edición, Thomson Learning.
23. AWS D1.2. Structural welding code. Aluminum.