

ANALISIS COMPARATIVO EN CORDONES DE SOLDADURA OBTENIDOS POR FRICTION STIR WELDING Y METODO TIG EN CHAPAS DE ALUMINIO DE ALTA RESISTENCIA DE USO AEROESPACIAL

Lacoste, Juan (*) – Feloy, Lucas –Vucetich, Danilo – Cozzarín, Ana Laura

(*)juan.lacoste@ing.unlp.edu.ar

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (UNLP)

Departamento de Mecánica

Calle 1 y 47, Tel: 423 – 6677/8 Interno 185

La Plata, Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

Las aleaciones de aluminio de alta resistencia son ampliamente utilizadas en la fabricación de aeronaves, misiles y en la industria aeroespacial, como así también, en accesorios y tanques para líquidos combustibles y de oxígeno. La razón de este amplio uso radica en su alta resistencia específica (relación de resistencia mecánica a densidad), su resistencia a la corrosión y eficiencia de carga especialmente en diseños de compresión. Dentro de los grupos de aleaciones de alta resistencia de uso en la industria aeroespacial se encuentran las aleaciones Al-Cu (2xxx), Al-Zn (7xxx) y Al-Li.

Al momento de unir las piezas parciales, por ejemplo para la confección final de una determinada estructura uno de los procesos más utilizados es el de soldadura. Si bien existen múltiples métodos de soldadura, los de mayor aplicación en la industria aeroespacial en aleaciones de aluminio son actualmente TIG y FSW. En función de esto, se ha realizado el estudio comparativo de cordones de soldadura obtenidos por ambos métodos sobre chapas de aleación de aluminio de alta resistencia AA2219.

El método de soldadura TIG es ampliamente conocido, motivo por el cual no se detalla su procedimiento. La soldadura por fricción y agitación es un proceso de unión de materiales en fase sólida. Una herramienta cilíndrica con movimiento de rotación se introduce en la línea de soldadura por medio de una fuerza axial, el roce producido por la herramienta con el material base genera un aumento en la temperatura suficiente para llevar el material a un estado plástico en el cual es capaz de fluir y así lograr la unión. Al estar el material permanentemente en estado sólido las pérdidas de propiedades mecánicas en la zona de la soldadura son minimizadas.

Durante los últimos años en el ProInTec I&D se ha trabajado en el desarrollo de aleaciones de aluminio de alta resistencia y en el procesado de estas, llegando a desarrollar, entre otras cosas, chapas de aleación AA2219, alambre de aporte de soldadura de aleación AA2319, y unión de dichas chapas por FSW con herramientas desarrolladas en el grupo de trabajo. Se ha logrado obtener exitosamente la unión de las chapas por métodos con y sin aporte de material y es debido a ello que se ha decidido efectuar el presente trabajo para comparar microestructuralmente y a través de propiedades mecánicas por ensayo de tracción los resultados de ambas uniones soldadas.

Los resultados obtenidos muestran, en términos de propiedades mecánicas, mayores valores de resistencia a la tracción en las probetas realizadas en chapas unidas por FSW respecto de las obtenidas con aporte de alambre de aleación AA2319. En cuanto a las características microestructurales se aprecia un tamaño de grano sustancialmente menor en el cordón soldado por FSW, situación que sustenta la superioridad en cuanto a propiedades mecánicas respecto de las chapas soldadas por el método TIG.

1.- INTRODUCCION

Las aleaciones de aluminio de alta resistencia son ampliamente utilizadas en la fabricación de aeronaves, misiles y en la industria aeroespacial, como así también, en accesorios y tanques para líquidos combustibles y de oxígeno. La razón de este amplio uso radica en su alta resistencia específica, su resistencia a la corrosión y eficiencia de carga especialmente en diseños de compresión. Dentro de los grupos de aleaciones de alta resistencia de uso en la industria aeroespacial se encuentran las aleaciones Al-Cu (2xxx), entre otras.

Al momento de unir las piezas parciales, por ejemplo para la confección final de una determinada estructura uno de los procesos más utilizados es el de soldadura. Si bien existen múltiples métodos de soldadura, los de mayor aplicación en la industria aeroespacial en aleaciones de aluminio son actualmente TIG y FSW. En función de esto, se ha realizado el estudio comparativo de cordones de soldadura obtenidos por ambos métodos sobre chapas de aleación de aluminio de alta resistencia AA2219.

1.1.- Descripción del proceso de soldadura por TIG

El procedimiento de soldadura por arco bajo gas protector con electrodo no consumible, también llamado TIG (Tungsten Inert Gas) utiliza como fuente de energía el arco eléctrico que se establece entre un electrodo no consumible y la pieza a soldar, mientras un gas inerte protege el baño de fusión. El material de aporte, cuando se utiliza, se aplica por medio de varillas. La figura siguiente muestra esquemáticamente los principios del proceso TIG.

El proceso TIG se puede utilizar para soldar una gran variedad de materiales, incluidos el aluminio y el magnesio y los materiales sensibles a la oxidación como el titanio, circonio y sus aleaciones. Puesto que el proceso posee las virtudes necesarias para conseguir soldaduras de alta calidad y con una elevada pureza metalúrgica, exentas de defectos y buen acabado superficial, es ideal para soldaduras de responsabilidad en la industria aeroespacial.

Como su tasa de deposición es baja, no resulta económico para soldar materiales con espesores mayores de 6-8 mm. El método TIG se utiliza para realizar soldaduras por puntos y por costuras.

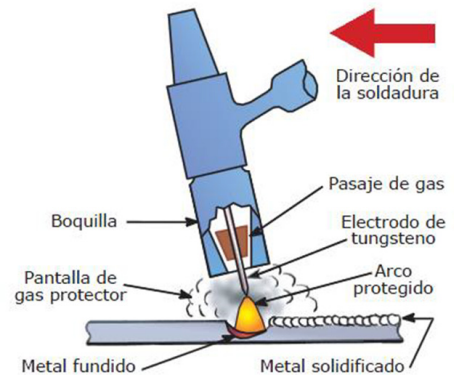


Figura 1: Esquema de funcionamiento del proceso de soldadura por TIG

Las ventajas del proceso son:

- Proceso adecuado para unir la mayoría de los metales.
- Arco estable y concentrado.
- Aunque se trata de un proceso esencialmente manual, se ha automatizado para algunas fabricaciones en serie, como tubería de pequeño espesor soldada longitudinal o helicoidalmente y para la fijación de tubos a placas en intercambiadores de calor.
- No se producen proyecciones (al no existir transporte de metal en el arco).
- No se produce escoria.
- Produce soldaduras lisas y regulares.
- Se puede utilizar con o sin metal de aporte, en función de la aplicación.
- Puede emplearse en todo tipo de uniones y posiciones.
- Alta velocidad de soldeo en espesores por debajo de 3-4 mm.
- Se pueden conseguir soldaduras de gran calidad.
- Permite un control excelente de la penetración en la pasada de raíz
- No requiere el empleo de fuentes de energía excesivamente caras.

- Permite el control independiente de la fuente de energía y del metal de aportación.

En cuanto a las limitaciones del proceso se puede nombrar;

- La tasa de deposición es menor que la que se puede conseguir con otros procesos de soldeo por arco).
- Su aplicación manual exige, en general, gran habilidad por parte del soldador.
- No resulta económico para espesores mayores de 10 mm.
- En presencia de corrientes de aire puede resultar difícil conseguir una protección adecuada de la zona de soldadura.

1.2.- Descripción del proceso de soldadura por FSW

A finales de 1991 fue concebido y desarrollado por The Welding Institute (TWI) un nuevo método de soldadura, el cual se denominó Friction Stir Welding (FSW). Este nuevo proceso demostró a lo largo de estos últimos años tener un gran potencial para la realización de cualquier tipo de uniones, en especial para aleaciones de aluminio.

En el proceso FSW una herramienta cilíndrica compuesta de dos cuerpos, el hombro y el pin, la cual gira a un determinado número de revoluciones, es introducida lentamente por una fuerza axial, entre la línea de unión de las dos chapas o placas a unir, las cuales se encuentran dispuestas a tope una con otra.

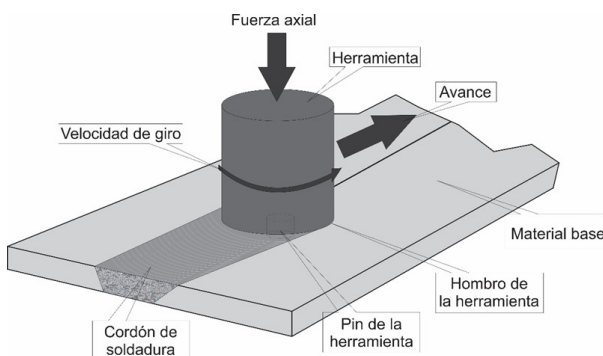


Figura 2: Esquema de funcionamiento del proceso de soldadura por FSW

También otras aplicaciones donde el proceso FSW ha sido adoptado comercialmente, resulta el caso de la industria de construcción naval, donde se aplica en la soldadura de variados componentes. En la industria de la construcción ha sido utilizada en la soldadura de puentes de aluminio, líneas de tubo de aluminio, intercambiadores de calor, fabricación de tubos, etc.

El calor de fricción es generado por el contacto entre el hombro de la herramienta de soldadura giratoria con la superficie de las chapas a soldar y la deformación del material promovida por el pin de la herramienta. Este calor provoca un ablandamiento del material, sin llegar a la fusión, favoreciendo la deformación del mismo. El movimiento de rotación y avance de la herramienta promueve un flujo y mezclado del material desde un borde hacia el otro de la soldadura, lo cual conduce a la unión, en estado sólido, entre las dos piezas.

Entre las principales variables a considerar en el proceso de soldadura FSW, las cuales son fácilmente controladas, se destacan:

- Velocidad de rotación de la herramienta.
- Fuerza axial que se aplica sobre la herramienta.
- Velocidad de avance de la herramienta.

El diseño de la herramienta juega un importante rol en la calidad final de la soldadura, como así también, en la velocidad de soldadura.

Las ventajas del proceso FSW resultan del hecho que la soldadura toma lugar en fase sólida, a temperaturas por debajo del punto de fusión de los materiales a unir. Por lo cual, resulta posible la unión de materiales que son difíciles de soldar por proceso de fusión convencional, tal el caso de aleaciones de aluminio de las serie 2XXX y 7XXX.

El proceso de FSW puede ser considerado como una técnica a aplicar en:

- Alas, fuselajes y colas de aviones.
- Tanques criogénicos para vehículos espaciales.
- Tanques de combustibles para aviones.

- Tanques de lanzamientos externos para aeronaves militares.
- Cohetes científicos y militares.
- Reparación de soldaduras MIG defectuosas.

Las ventajas del proceso de soldadura por FSW son:

- Baja distorsión de las piezas soldadas.
 - Excelentes propiedades de tracción, fatiga y flexión
 - En la actualidad existen algunas alternativas a fin de minimizar tal situación.
 - No se requiere material de aporte
 - No se requiere preparación previa de la junta
 - Permite la soldadura de materiales disímiles
 - Reduce los costos y tiempos de producción
 - Puede operar en todas las posiciones
 - No produce humos, ni salpicaduras de material fundido
 - Actualmente equipos comerciales alcanzan altas velocidades de soldadura
- Las limitaciones del proceso son:
- Las piezas a soldar deben ser rígidamente fijadas
 - La perforación al final del cordón que es producida cuando se retira la herramienta.

2.- METODOLOGIA

La metodología de trabajo planteada para llevar a cabo el conjunto de actividades ha consistido en principio, en la generación de una serie de uniones soldadas por el método TIG y el método FSW a partir de chapas de aleación de aluminio AA2219 como material base.

Para el proceso de soldadura por FSW se ha utilizado una fresa cnc de tres ejes dispuesta en instalaciones del grupo de trabajo ProInTec I&D. Los parámetros de trabajo han sido establecidos en función a experiencias previas y la herramienta utilizada para efectuar la soldadura ha sido íntegramente diseñada en Facultad, la cual se muestra a continuación.



Figura 3: Herramienta diseñada en ProInTec I&D utilizada en FSW

Para la generación de piezas soldadas por el método TIG también se han utilizado como material de base, chapas de aluminio AA2219 de 2,5 mm de espesor. En este caso, para la ejecución del proceso de soldadura se ha contratado un agente externo. Cabe destacar que el material de aporte utilizado para la unión de chapas de AA2219 soldadas consiste en varillas de alambre de 2 mm de diámetro de aleación AA2319, que ha sido desarrollado y fabricado íntegramente por ProInTec I&D, el cual mediante estudios y ensayos previos ha demostrado encontrarse dentro del marco de características y propiedades mecánicas para este insumo a nivel mundial.

Una vez obtenidas las piezas soldadas, el paso siguiente ha sido la generación de probetas para ensayos de tracción. Para ello, tanto en el método FSW como TIG se han seguido los lineamientos establecidos por las normas AWS correspondientes a cada proceso. La figura siguiente presenta un esquema donde se indica la metodología de obtención de muestras para análisis metalográficos y probetas de tracción.

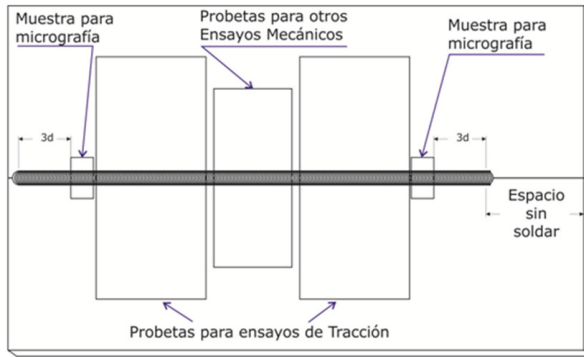


Figura 4: Esquema de corte de probetas para el análisis micrográfico

Las muestras extraídas de los cordones de soldadura resultantes de ambos métodos se han procesado a partir del lijado y pulido de la sección transversal del cordón con el objetivo de obtener metalografías que expongan la variación y evolución microestructural desde el material base hasta el centro del cordón. Para ello, una vez pulidas a espejo, las muestras han sido atacadas por reactivos químicos y visualizadas a partir de microscopía óptica. Posteriormente se han realizado composiciones de imágenes para lograr vistas completas de la sección transversal del cordón de soldadura con el objetivo de estudiar la morfología y el tamaño de grano de las zonas afectadas por los procesos.

En cuanto a la determinación de las propiedades mecánicas, se han mecanizado probetas de tracción a partir de las muestras extraídas de las chapas soldadas indicadas en la figura 4.

3.- DESARROLLO

Siguiendo los lineamientos detallados en el apartado de Metodología, se realizaron una tanda de muestras tanto bajo el proceso de Friction Stir Welding como del proceso TIG. Las figuras 5 y 6 muestran un ejemplo de las chapas de aluminio de alta resistencia soldadas.



Figura 5: Ejemplo de muestra generada por FSW

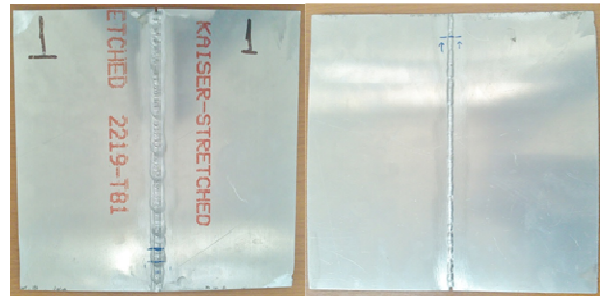


Figura 6: Ejemplo de muestra generada por TIG

La verificación de la sanidad de las muestras se realizó bajo los condicionantes de la norma mencionada en el apartado anterior. Este procedimiento específico que luego de generada la muestra, se deben practicar, como mínimo, las siguientes operaciones:

- Inspección visual de la muestra.
- Ensayos de tintas penetrantes en la raíz del cordón.
- Micrografía de la sección transversal del cordón.

Con respecto a la inspección visual, todas las muestras generadas fueron aprobadas. Ninguna mostró signos de falta de penetración, cavidades eclosionadas, excesivo flash o desalineación.

Aprobada la inspección visual de las muestras, se procedió a realizar el ensayo de tintas penetrantes. Éste fue realizado por personal entrenado para Nivel 2 bajo el procedimiento propio con el nombre de "Procedimiento para la inspección por líquidos penetrantes soldaduras de

chapas de aluminio” y bajo las siguientes condiciones:

- Ensayo de líquidos penetrantes Tipo II (penetrante visible).
- Método C (removible con solvente)
- Según norma ASTM E165-02

El resultado del procedimiento fue exitoso. En la figura 7 se muestra un ejemplo del ensayo en una soldadura mediante FSW.

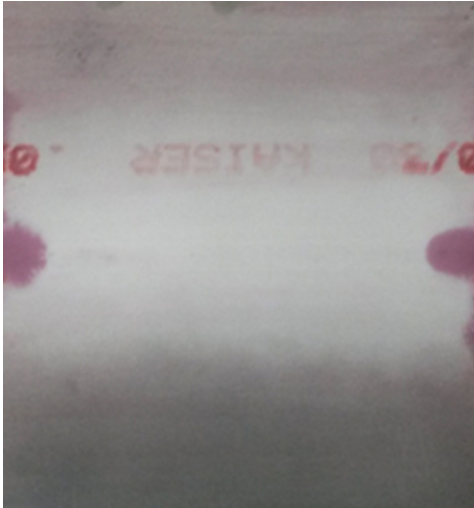


Figura 7: Ejemplo de ensayo de líquidos penetrantes.

Para completar la inspección de las muestras con el objetivo de determinar su sanidad, se procedió a realizar micrografías de la sección transversal del cordón. El procedimiento generado bajo las normas anteriormente mencionadas para la realización de estas micrografías determina que se deben obtener dos cortes del cordón según el esquema mostrado en la figura (la que muestra los cortes).

Las figuras 8 y 9 muestran un ejemplo de las composiciones de las micrografías realizadas para el análisis. Estas imágenes fueron utilizadas, no sólo para revisar la sanidad de las muestras, buscando principalmente cavidades internas, sino también para analizar la estructura final de los cordones.

Para generar las composiciones, los cortes de las muestras se incluyeron en un polímero, se lijaron, pulieron hasta pasta de diamante de 0,2 um. En este punto las muestras se separaron, las realizadas por el proceso TIG fueron tratadas

mediante anodizado, mientras que las muestras realizadas por FSW fueron atacaron los reactivos químicos Graff y Keller. Esta diferencia se debió a que éstos fueron los mejores resultados finales para el estudio pretendido.

Posteriormente, se llevaron al microscopio óptico donde se obtuvieron las imágenes con un aumento de 50X. Todas las imágenes individuales fueron luego compaginadas en un software para formar la visión total del cordón de soldadura.

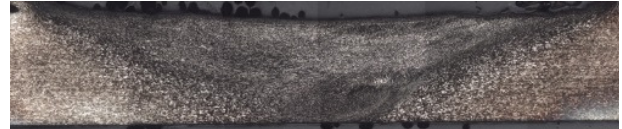


Figura 8: Composición de micrografías de unión soldada de FSW. Aumento 50x

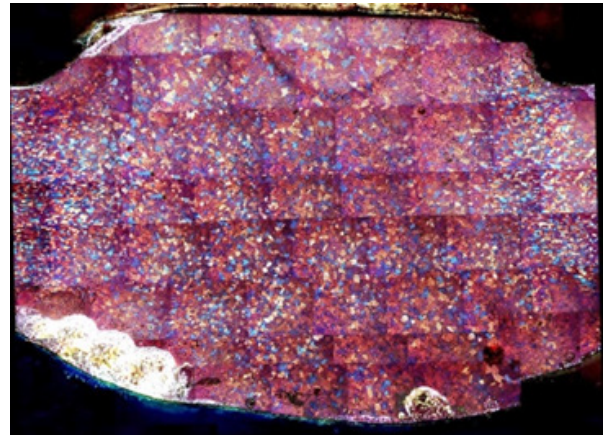


Figura 9: Composición de micrografías de unión soldada de TIG con luz polarizada. Aumento 50x

Ambas micrografías son elocuentes. Para las condiciones de ambos procesos se pueden identificar las zonas características de las soldaduras como la Zona Afectada por el Calor, el Material Base, la Zona de Batido en el caso de FSW y la Zona de Fusión en el caso de TIG.

Un aspecto del análisis resalto en el estudio general. En la figura 10, se puede observar un acercamiento de la región de transición entre el material base, la ZAC y la región de soldadura de ambos procesos

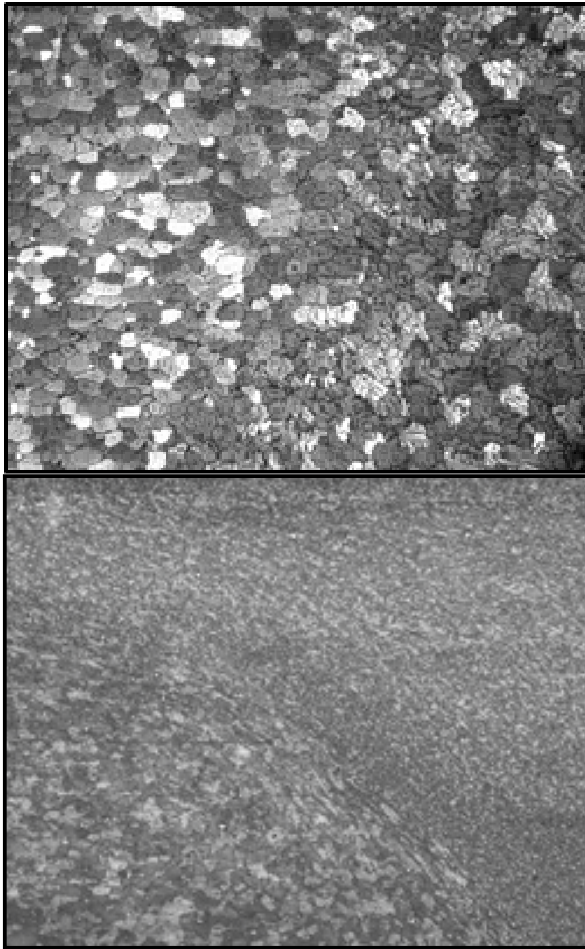


Figura 10: Acercamiento de región de transición. Superior: cordón de soldadura por TIG. Inferior: Cordón de soldadura por FSW.

El análisis de ambas micrografías surge de la plena observación. En el caso de la imagen de la muestra de soldadura realizado por TIG, se puede ver perfectamente la transición entre la zona afectada por el calor con la zona soldada. La estructura de la segunda claramente presenta las características de una estructura proveniente de la fusión. Se presenta la transición microestructural entre la zona del cordón de soldadura propiamente dicho y el material base, donde pueden observarse granos en los cuales ha ocurrido una solidificación total desde el estado líquido, granos en los cuales no se ha producido ningún cambio visible y en la zona entre ellos, granos con fusión parcial y posterior solidificación.

En el caso de la figura 10 inferior, micrografía obtenida de la soldadura realizada

mediante FSW, se muestra análogamente la misma región que en la figura 10 superior. En ella se puede observar, de la misma manera, la transición desde el material base a la zona soldada propiamente dicha o zona de batido. La diferencia radica que, en lugar de presentar una estructura proveniente de la fusión, se observa que a medida que se avanza desde el material base, se aprecia primero una región de material fuertemente deformado plásticamente, que rápidamente se transforma en material recrystalizado con un tamaño de grano que promedia los 2 μm .

Ensayos mecánicos

Luego de haber demostrado la sanidad de las muestras realizadas se procedió a medir las propiedades mecánicas logradas por las uniones. Para esto se prepararon probetas de tracción según las normas mencionadas. La figura 11 muestra el esquema de la probeta.

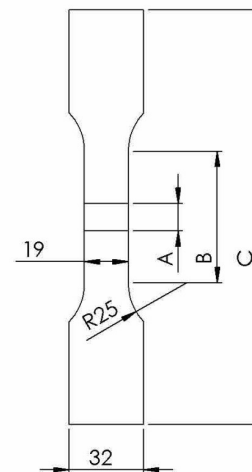


Figura 11: Esquema de la probeta de tracción utilizada según norma AWS

A: la longitud debe ser igual a la dimensión más grande del material soldado en la dirección del eje longitudinal de la probeta.

B: la longitud de la sección calibrada debe ser igual a A más 13 mm de cada lado, con un mínimo de 57 mm total. La soldadura deberá estar en el centro de sección calibrada.

C: la longitud de la probeta estará limitada por posibilidad de la máquina de tracción

Los ensayos de las probetas de las muestras soldadas se realizaron con extensómetro a la rotura. Este método permite determinar de manera más exacta la resistencia máxima a la tracción. Para un mejor resultado, se realizaron 2 probetas por muestra, dando como resultado un total de casi 20 ensayos por tipo de proceso. Esto es debido a que la desviación estándar de los resultados es significativamente mayor a los del material base.

Para realizar la comparación de propiedades, es importante recordar los datos obtenidos del material base. Los ensayos a la chapa base se realizaron con la probeta subdimensionada enmarcada en la norma IRAM 766 en las tres direcciones que marca la norma citada. Los resultados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Resistencia mecánica de la chapa de aluminio de 2,4 mm.

Probetas	Tensión de fluencia [MPa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Alargamiento a la rotura [%]
Longitudinales a la dirección de laminación			
Media	358,9	454,9	12,59
Desviación estándar	6,181	6,34	0,6239
Transversales a la dirección de laminación			
Media	337,9	439,7	12,35
Desviación estándar	12,02	11,22	1,502
45° con respecto a la dirección de laminación			
Media	358,3	457,1	12,92
Desviación estándar	1,302	1,572	0,3483

El promedio de los resultados del ensayo de tracción realizados a las probetas obtenidas de las muestras soldadas se muestra en la tabla 2.

Tabla 2: Resultados de ensayos en probetas soldadas

	TIG	FSW
Resistencia máxima a la tracción ¹ [MPa]	264	304,3

En la tabla precedente puede notarse que los mayores resultados se obtuvieron en las muestras conformadas con el método de FSW

4.- CONCLUSIONES

La diferencia en los resultados de los ensayos de tracción se divisa sin la necesidad de un análisis profundo. La resistencia a la tracción de las muestras soldadas por FSW es aproximadamente un 15% más alta que las soldadas por el método TIG, llegando al 67 % de eficiencia de soldadura contra un 58 % presentado por las soldadas por fusión.

En lo que respecta a las microestructuras, en los cordones de soldadura generados por FSW se encuentra un tamaño de grano muy inferior a aquel que se presenta en los cordones realizados por TIG. Esto se debe a que mientras que el cordón por TIG tiene una estructura típica de un proceso de solidificación luego de una fusión, el material del cordón por FSW se encuentra fuertemente deformado, y debido a la temperatura a la cual se encuentra recristaliza en forma dinámica, obteniéndose un tamaño de grano promedio de 2 μm

5.- AGRADECIMIENTOS

Se agradece a VENG CONAE la financiación a través de un convenio firmado con la Facultad de Ingeniería de la UNLP para el desarrollo de aleaciones de alta resistencia para uso aeroespacial.

¹ Resistencia promedio obtenida de aproximadamente 20 probetas de cada proceso.

6.- REFERENCIAS

- [1] American Society for Metals. ASM Specialty Handbook, Aluminium and Aluminium Alloys. 1996.
- [2] Metals Handbook - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials. s.l.: American Society for Metals, 1992. Vol. 2.
- [3] American Welding Society. Welding Handbook. 2007. Vol. 3.
- [4] Adamowski, J. y Szkodo, M. Friction Stir Welds (FSW) of aluminium alloy AW6082-T6. Journal of achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2007, Vol. 20, págs. 403 - 406.
- [5] Anancio-Filho, S. T., et al., et al. Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminium alloys 2024-T351 and 6056-T4. Journal of materials processing technology. 2008, Vol. 206, pp. 132 - 142.
- [6] Arora, A., DebRoy, T. and Bhadeshia, H. K. D. H. Back-of-the-envelope calculations in friction stir welding - Velocities, peak temperature, torque, and hardness. Acta Materialia. 2011, Vol. 59, pp. 2020 - 2028.
- [7] Arora, A., y otros, y otros. Strains and strain rates during friction stir welding. Scripta Materialia. 2009, Vol. 61, págs. 863 - 866.
- [8] Xu, S., y otros, y otros. Finite element simulation of material flow in friction stir welding. Science and Technology of Welding & Joints. 2001, Vol. 6, 3, págs. 191 - 193.
- [9] Vural, M., y otros, y otros. On the friction stir welding of aluminium alloys EN AW 2024-O and EN AW 5754-H2. Archives of Materials Science and Engineering. 2007, Vol. 28, págs. 49 - 54.
- [10] Ulysse, P. Three-dimensional modelling of the friction stir welding process. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2002, Vol. 42, pp. 1549 - 1557.
- [11] Threadgill, P. L., y otros, y otros. Friction Stir Welding of aluminium alloys. International Materials Reviews. 2009, Vol. 54, págs. 49 - 93.
- [12] Thomas, W. M., y otros, y otros. Improvements relating to friction welding. 5 460 317; EPS 0 616 490 US, 1991.
- [13] Thomas, W. M., Threadgill, P. L. y Nickolas, E. D. Friction Stir Welding of Steel: Part Three. Key of Metals. 2008.
- [14] —. Friction Stir Welding of Steel: Part One. Key of Metals. 2008.
- [15] Thomas, W. M., y otros, y otros. Friction Stir Butt Welding. 9125978.8 GB, 1991.
- [16] Tang, W., y otros, y otros. Heat Input and Temperature Distribution in Friction Stir Welding. Process. Manuf. Sci. 1999, págs. 163 - 171.
- [17] Rowe, C. E. D. y Thomas, W. Advances in tooling materials for Friction Stir Welding. TWI and Cedar Metals Ltd. 2006.
- [18] Reynolds, A. P. Visualisation of material flow in autogenous friction stir welds. Science and Technology of Welding & Joints. 2000, Vol. 5, 2, págs. 120 - 124.
- [19] Nandan, R., DebRoy, T. and Bhadeshia, H. K. D. H. Recent advances in friction-stir welding - Process, weldment structure and properties. Progress in Materials Science. 2008, Vol. 53, pp. 980 - 1023.
- [20] Mishra, Rajiv y Mahoney, Murray. Friction Stir Welding and Processing. s.l.: ASM International, 2007.
- [21] Lakshminarayanan, A. K., Malarvizhi, S. and Balasubramanian, V. Developing friction stir welding window for AA2219 aluminium alloy. Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2011, Vol. 21, pp. 2339 - 2347.
- [22] Kumar, K. and Kalias, S. V. The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation. Materials Science and Engineering A. 2008, Vol. 485, pp. 367 - 374.
- [23] Jata, K. V. and Semiatin, S. L. Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys. Scripta Mater. 2000, Vol. 43, pp. 743 - 749.
- [24] Elangovan, K. and Blasubramanian, V. Influence of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. Materials Science and Engineering A. 2007, Vol. 459, pp. 7 - 18.
- [25] D'Urso, G., et al., et al. The effect of process parameters and tool geometry on mechanical properties of friction stir welded aluminium butt joints.

- [26] Chen, Y. C., Feng, J. C. y Liu, H. J. Precipitate evolution in friction stir welding of 2219 - T6 aluminum alloys. *Materials Characterization*. 2009, Vol. 60, págs. 476 - 481.
- [27] Chen, Y., Liu, H. and Feng, J. Friction stir welding characteristics of different heat-treated-state 2219 aluminium alloy plates. *Materials Science and Engineering A*. 2006, pp. 21 - 25.
- [28] Proc. 2nd Int. Symp on Friction Stir Welding. Bendzsak, G. J., North, T. H. y Smith, C. B. The Welding Institute, Sweden : s.n., 2000. Vol. Paper 1.
- [29] International Standard Organization. ISO 25239-2. Friction Stir Welding - Aluminium - Part 2: Design of weld joints. 2011.
- [30] —. ISO 25239-4. Friction Stir Welding - Aluminium - Part 4: Specification and qualification of welding procedures. 2011.
- [49] International Standard Organisation. ISO 25239-5. Friction Stir Welding - Aluminium - Part 5: Quality and inspection requirements. 2011.