

EVALUACIÓN DE TENSIONES RESIDUALES EN SOLDADURA DE ALUMINIO POR FSW Y GMAW

J.C. Melendo⁽¹⁾, A. Burgueño⁽²⁾, Leonardo Tufaro⁽¹⁾ y H. G. Svoboda^(1,3,4)

(1) Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA.

(2) Centro de Investigación y Desarrollo en Mecánica, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, ARGENTINA.

(3) Laboratorio de Materiales y Estructuras, INTECIN, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA.

(4) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, ARGENTINA.

E-mail (autor de contacto): hsvobod@fi.uba.ar

RESUMEN

El proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW) ha revolucionado en los últimos años el campo de la tecnología de la soldadura. Su mayor aplicación se ha dado en las aleaciones de aluminio, aunque hoy en día se utiliza para prácticamente todos los materiales. Una de las múltiples ventajas de este proceso es el menor nivel de tensiones residuales asociado a que dicho procesos se produce en estado sólido por lo que los gradientes térmicos durante la soldadura son menores que en proceso de soldadura por fusión. En el presente trabajo se analizaron las tensiones residuales en juntas de aluminio soldadas por FSW y por el proceso de soldadura por arco eléctrico con alambre macizo y protección gaseosa (GMAW), habitualmente empleado para estos materiales, comparándose los resultados obtenidos. A este fin se soldaron probetas a tope de 150x150 mm en chapa de aluminio AA1050 y de AA5052 de 3 mm de espesor mediante ambos procesos de soldadura mencionados. La medición de tensiones residuales se realizó en la longitud media de las probetas soldadas, mediante los métodos de agujero ciego (ASTM E837-01) y de seccionamiento con extensómetros lineales y rosetas. Se determinaron el estado e tensiones en distintos puntos de la probeta, así como las variaciones de las tensiones residuales longitudinales, en función de la distancia a la línea central del cordón. Los resultados mostraron que las probetas soldadas mediante FSW presentaron un menor nivel de tensiones residuales que aquellas soldadas por GMAW, para ambos materiales analizados. Asimismo, la técnica de agujero ciego presentó valores mayores que la de seccionamiento.

Tópico: 2

Palabras clave: tensiones residuales, soldadura, aluminio, GMAW, FSW

1. INTRODUCCIÓN

Las tensiones residuales se definen como campos de tensiones que se encuentra en ausencia de cargas externas. Es decir, aquellas que no son requeridas por una estructura para mantener su equilibrio con el medio. Las mismas pueden ser una parte importante de las tensiones totales actuantes en un componente en servicio y presentan una importante influencia sobre la vida a la fatiga, fractura frágil como así también sobre la corrosión bajo tensiones. Es, por lo tanto, de suma importancia conocer el nivel de tensiones residuales y su distribución para poder estimar la vida crítica de un componente, especialmente de aquellos que se encuentran soldados [1-3].

Entre las técnicas más empleadas para la medición de tensiones residuales en soldadura se encuentran la técnica de agujero ciego (ASTM E837-01), difracción de rayos X, técnicas de seccionamiento y otras [2].

Debido a la gran cantidad de variables que afectan la magnitud y la distribución de tensiones residuales es de interés el estudio del efecto de los procesos de fabricación de elementos estructurales, y los parámetros empleados, sobre el nivel de tensiones residuales introducidas.

Durante la soldadura debido al aporte de calor localizado se generan gradientes térmicos que dan origen a un campo de tensiones residuales, las cuales podrán alcanzar valores cercanos al límite de fluencia del material a temperatura ambiente [3]. Las tensiones residuales en soldadura serán principalmente en dirección longitudinal y transversal al cordón, siendo las primeras en general las de mayor magnitud [1]. A su vez

podrán variar en el espesor. En un componente soldado existirán zonas con tensiones residuales de tracción y otras con tensiones de compresión [3]. El valor de las tensiones residuales depende entre otros factores de la potencia de la fuente, la velocidad de enfriamiento, el material base y el de aporte y la forma de sujeción del componente [3].

El proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW) ha revolucionado en los últimos años el campo de la tecnología de la soldadura. Su mayor aplicación se ha dado en las aleaciones de aluminio, aunque hoy en día se utiliza para prácticamente todos los materiales. Una de las múltiples ventajas enunciadas de este proceso es el menor nivel de tensiones residuales, debido a que se produce en estado sólido por lo que los gradientes térmicos durante la soldadura son menores [1]. Las aleaciones de aluminio para fines estructurales habitualmente son soldadas mediante el proceso Gas Metal Arc Welding (GMAW), proceso de soldadura por arco eléctrico con alambre macizo y protección gaseosa, que involucra la fusión del material a soldar.

El objetivo del presente trabajo es analizar las tensiones residuales en juntas de aluminio AA1050 y AA5052, soldadas por FSW y por el proceso de soldadura por arco eléctrico GMAW mediante las técnicas de agujero ciego y de seccionamiento, analizando comparativamente ambos procesos.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

A fin de alcanzar los objetivos propuestos se soldaron probetas de chapa de aluminio AA1050 y de AA5052 de 150mmx70mmx3mm, mediante los procesos GMAW y FSW. En la Tabla 1 se muestran los parámetros de soldadura empleados en cada caso. En la Figura 1 se muestran probetas soldadas por ambos procesos analizados.

Tabla 1. Parámetros de soldadura empleados para GMAW y FSW.

GMAW					FSW				
I (A)	V (V)	v (mm/min)	Gas	Dp-p (mm)	Vrot (rpm)	Vav (mm/min)	Ang (°)	Pin	Dh/Dp
130	26	35	Ar	20	514	78	1,5	cuad	5

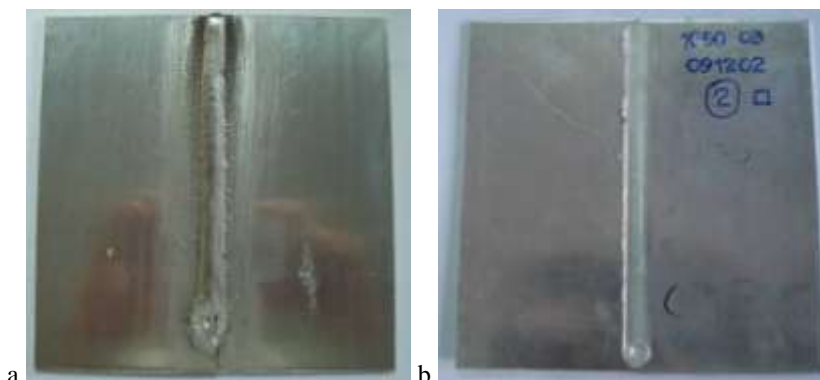


Figura 1. Probetas soldadas: a- GMAW y b- FSW.

Para la medición de tensiones residuales se emplearon las técnicas de agujero ciego (HD) y la de seccionamiento (S). Para el caso de HD se siguieron los lineamientos de la norma ASTM E837-01 [4], utilizándose rosetas tipo A (EA-13-062RE-120), las cuales se ubicaron sobre probetas soldadas por ambos procesos a unos 20 mm de la línea central del cordón de soldadura (LC), en la media de su longitud. Asimismo, sobre una probeta soldada en AA1050 mediante FSW se ubicó una roseta en el borde del cordón. Para la técnica S se utilizaron extensómetros unidireccionales y rosetas tipo delta. En el caso de los SG unidireccionales, se ubicaron en dirección paralela al cordón de soldadura a distintas distancias del mismo, a fin de evaluar el gradiente de tensiones residuales longitudinales en cada caso. Sobre una probeta soldada en AA1050 mediante el proceso GMAW se removió el refuerzo del cordón y se ubicó una roseta delta sobre el centro del cordón. Asimismo para una probeta soldada por FSW en el mismo material se instrumentó en la misma posición otra roseta similar, determinándose en ambos casos el estado de tensiones.

En la Figura 2 se observan probetas instrumentadas con los distintos tipos de SG para la medición mediante ambas técnicas.

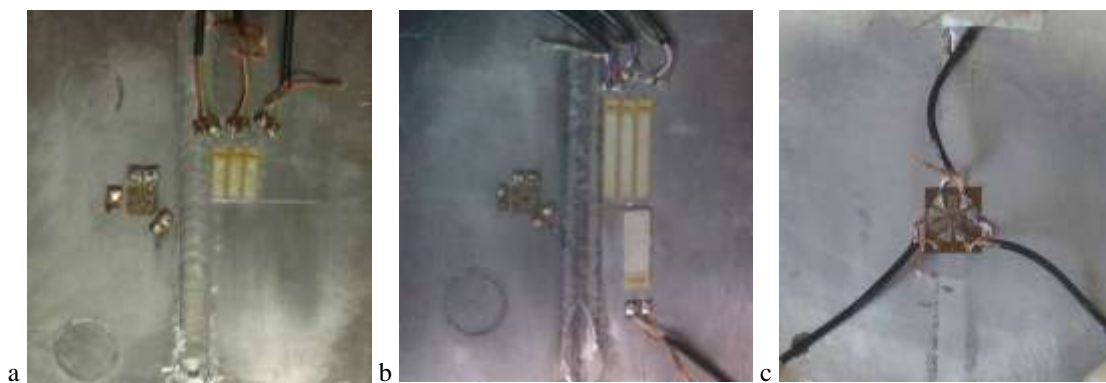


Figura 2. Probetas de aluminio soldadas por: a-FSW instrumentada para HD y S (unidir.), b-GMAW instrumentada para HD y S, c- GMAW instrumentada para S (roseta).

En todos los casos la preparación de la superficie fue similar habiéndose realizado de acuerdo a las recomendaciones del fabricante de los extensómetros eléctricos (SG) [5]. Se realizó un leve lijado de la superficie con una lija de granulometría 400, luego se limpió la superficie de la chapa con una gasa embebida en acetona y se pasó por la superficie de la misma hasta la remoción de toda la suciedad superficial. Posteriormente se marcaron las referencias para la ubicación del SG. El mismo se posicionó por medio de una cinta y se aplicó el pegamento en la superficie de la chapa, procediendo al pegado del SG, realizando presión sobre el mismo por unos segundos. Después de dejar secar unos minutos se retiró con sumo cuidado la cinta. El pegamento empleado fue Loctite 416. Finalmente se procedió al soldado de los cables (tripolares con una maya metálica) y se roció la zona con un aerosol protector. Para las mediciones se utilizó un puente Vishay P3500 en conjunto con una caja de décadas Vishay DC-10. En la Figura 3 se puede observar el equipamiento empleado.



Figura 3. a- Equipo empleado y probeta instrumentada, b- dispositivo para agujero ciego.

Para la técnica HD se utilizó una grilla con un diámetro medio de $D=5,13$ mm. La roseta fue posicionada de modo de que la dirección x coincida con el cordón de soldadura. La broca utilizada fue de 1,54 mm de diámetro. Se asumió que las tensiones son uniformes en el espesor, por lo que se realizaron ocho incrementos de profundidad de 0,25 mm cada uno hasta una profundidad de $Z=2\text{mm}$ ($0,4D$). Posteriormente se realizó el agujero pasante. Para cada intervalo, a partir del conjunto de deformaciones medidas (ϵ_1 , ϵ_2 y ϵ_3) se calcularon los valores de las deformaciones combinadas y luego las tensiones combinadas a partir de las cuales se calcularon las tensiones totales. Como resultados se obtienen las tensiones totales σ_x , σ_y , τ_{xy} , σ_{\max} , σ_{\min} y β . El ángulo β se define entre la σ_{\max} y el SG 1 de la roseta, el cual fue posicionado en todos los casos coincidente con la dirección x (transversal al cordón de soldadura). De acuerdo a lo descrito en dicha norma los valores determinados en el presente trabajo son aproximados, dado que el espesor de la chapa analizada se encuentra entre $0,4D$ y $1,2D$, por lo que no se la puede considerar ni fina, ni gruesa. En este caso se interpola entre los valores obtenidos para chapa fina y para chapa gruesa [4].

El método de seccionamiento consistió realizar un corte sobre la probeta instrumentada con los SG. Este corte relaja las tensiones residuales, pudiendo obtenerse valores de las tensiones actuantes en las direcciones analizadas mediante la ley de Hook. Este método ha sido aplicado con éxito en diversas aplicaciones [1,2,6]. El corte de la chapa para el método S se realizó con un torno de mano de altas revoluciones con un disco

abrasivo, cuidando de no generar calentamiento. En el caso de los extensómetros unidireccionales se realizó el corte total de la chapa. En el caso de la roseta delta, se realizó el corte de modo de extraer la zona donde se encontraba la roseta.

Posteriormente a la medición de tensiones residuales se extrajeron muestras para preparación macrográfica y determinación de microdureza Vickers.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las propiedades mecánicas de los materiales analizados fueron, para el AA 1050: $\sigma_y=100\text{MPa}$, $\sigma_{uts}=110\text{MPa}$ y $\epsilon_{rot}=10\%$. Para fueron $\sigma_y=170\text{MPa}$, $\sigma_{uts}=250\text{MPa}$ y $\epsilon_{rot}=12\%$. El módulo de elasticidad medido fue de 70 GPa para el 5052 y de 67,5 GPa para el 1050. El coeficiente de Poisson asumido fue de $\nu=0,33$ para ambos materiales. La microdureza Vickers medida sobre ambos materiales fue de 40HV para el AA1050 y de 70 HV para el AA5052.

3.1 Método de Agujero Ciego

En la Figura 4 se observan las deformaciones medidas en función de la profundidad del agujero y los valores de las tensiones residuales totales, calculados de acuerdo al procedimiento descrito en la norma.

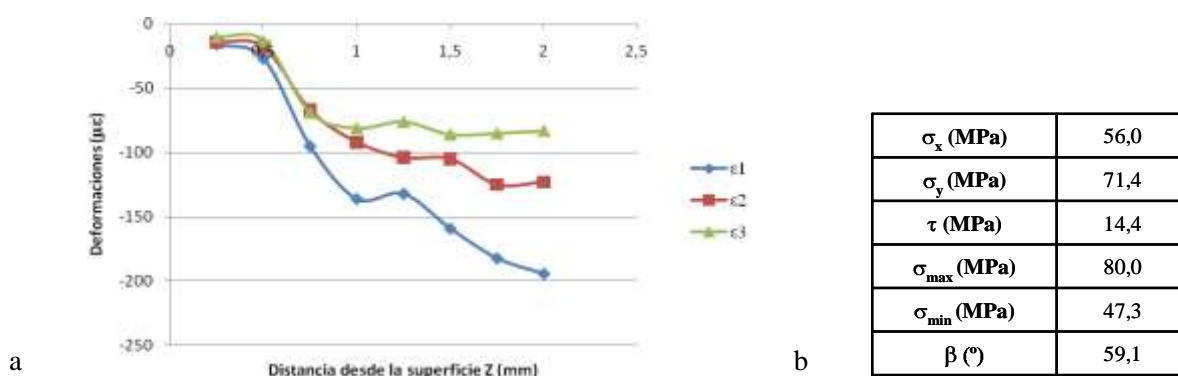


Figura 4. Deformaciones medidas en función de la profundidad del agujero, b- Tensiones residuales totales, para AA1050 FSW ubicada en el borde del cordón (6 mm de la LC).

Se puede observar que las tres deformaciones relajadas toman inicialmente valores negativos, los cuales aumentan monótonamente hasta los 2 mm de profundidad. Los resultados obtenidos son consistentes con otros reportados en la literatura para materiales similares soldadas mediante FSW [1]. Las tensiones medidas por agujero ciego en el borde del cordón de la soldadura FSW son similares a las reportadas en la literatura para este tipo de soldaduras y materiales, indicándose que ambas tensiones principales muestran valores similares [7], inclusive siendo superior la tensión σ_y que la σ_x [1]. En este sentido se observa una dispersión importante en los resultados reportados en función de los parámetros de proceso empleados y del método de medición de las tensiones residuales utilizado. La tensión máxima fue del orden del 80% del límite de fluencia del material, mientras que la tensión en la dirección longitudinal fue del orden del 55% de dicha propiedad. Los valores de tensiones residuales en esta zona son los máximos de toda la junta [7].

En la Figura 5 se observan las deformaciones medidas en función de la profundidad del agujero y los resultados de las tensiones residuales totales, calculadas de acuerdo al procedimiento descrito en la norma. Puede verse como dos de las deformaciones relajadas toman valores negativos, mientras que la tercera deformación lo toma valores positivos, en todos los intervalos de medición. Las tensiones residuales medidas son similares a las determinadas para este proceso de soldadura en aleaciones de aluminio, en cuanto al módulo y a los signos [6].

En la Figura 6 se pueden ver las deformaciones medidas en función de la profundidad del agujero y los resultados de las tensiones residuales totales, calculadas de acuerdo al procedimiento descrito en la norma. Se observa que las deformaciones relajadas toman valores negativos inicialmente, aumentando los mismos en función de la profundidad en forma monótona hasta los 2 mm. Los valores de tensiones residuales determinados en este punto para esta aleación son superiores a los medidos para AA1050, asociado al mayor límite elástico de este material.

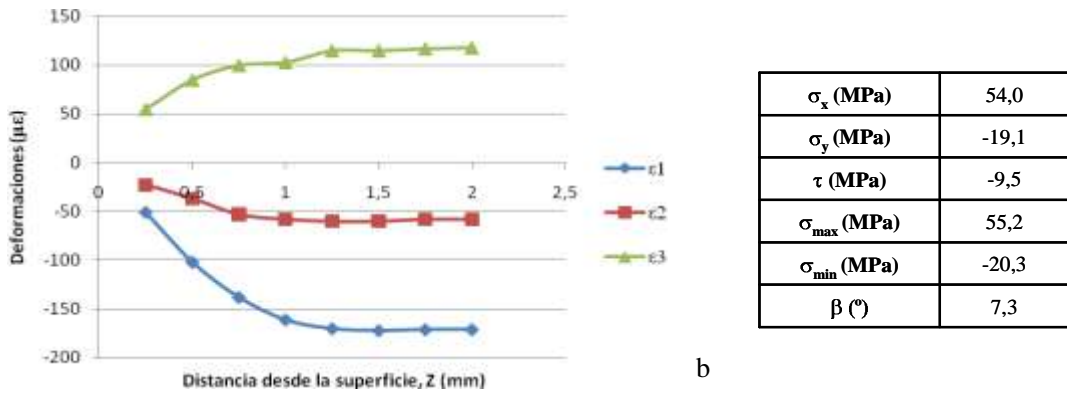


Figura 5. a- Deformaciones medidas en función de la profundidad del agujero, b- Tensiones residuales totales, para AA1050 GMAW ubicada a 20 mm de la LC.

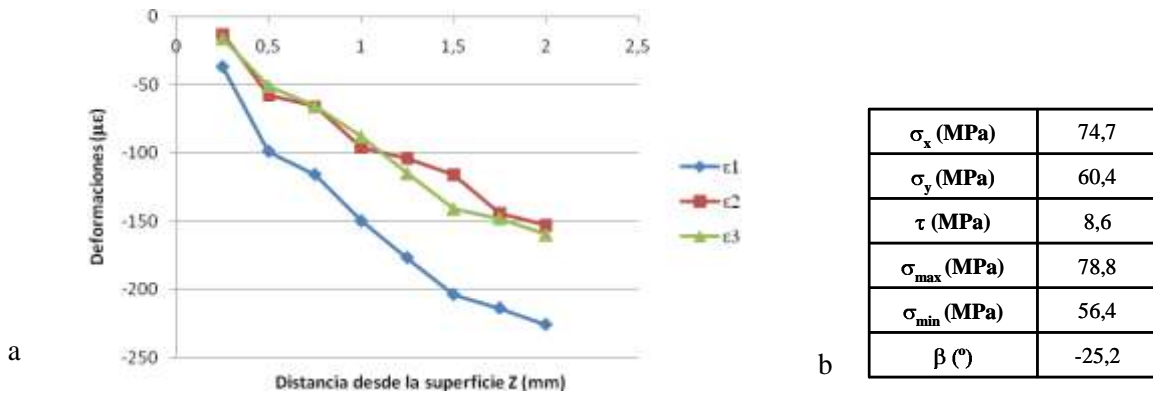


Figura 6. Deformaciones medidas en función de la profundidad del agujero, b- Tensiones residuales totales, para AA5052 soldada por FSW ubicada a 20 mm de la LC.

Asimismo, los valores medidos de tensiones residuales son se encuentran en el rango superior de los valores medidos empleando otras técnicas, tanto para las tensiones longitudinales como para las transversales [7]. La tensión máxima corresponde a aproximadamente el 45% de límite de fluencia del material, mientras que la tensión longitudinal se encuentra alrededor del 40%.

En la Figura 7 se pueden ver las deformaciones medidas en función de la profundidad del agujero y los resultados de las tensiones residuales totales, calculadas de acuerdo al procedimiento descrito en la norma.

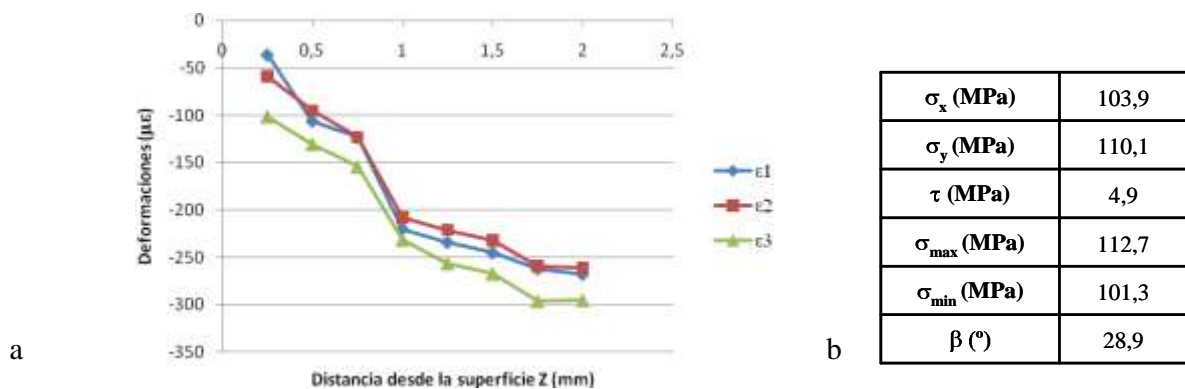


Figura 7. a- Deformaciones medidas en función de la profundidad del agujero, b- Tensiones residuales totales, para AA5052 soldada por GMAW ubicada a 20 mm de la LC.

Se observa que las deformaciones relajadas toman valores negativos inicialmente, aumentando los mismos en función de la profundidad en forma monótona hasta los 2 mm, tomando magnitudes similares. Los valores de tensiones residuales medidos para GMAW se encuentran alrededor de un 60% del límite de fluencia del material, siendo superiores a los determinados para el proceso FSW en aproximadamente un 45%. Para

ambos procesos los valores determinados en este material se encuentran en el rango superior de los valores reportados en la literatura.

Cabe aclarar que las tensiones calculadas mediante la técnica de agujero ciego son sólo valores aproximados, de acuerdo a lo indicado en la norma aplicada, dado que no se cumple la hipótesis de uniformidad de las mismas en el espesor y que en ciertas mediciones se superó el 60% del límite de fluencia [4]. Si se consideraran sólo los valores de las tensiones que no superan dicha fracción del límite de fluencia las tensiones residuales totales calculadas serían menores. Asimismo, para el caso de tensiones no uniformes debería aplicarse la metodología propuesta en la nueva versión de la norma ASTM-E837-08.

3.2 Método de seccionamiento con SG longitudinales

En la Figura 8 se pueden observar los resultados obtenidos mediante la técnica de seccionamiento de la medición de tensiones residuales longitudinales en función de la distancia a la línea central del cordón, para el AA1050 en ambos procesos de soldadura analizados.

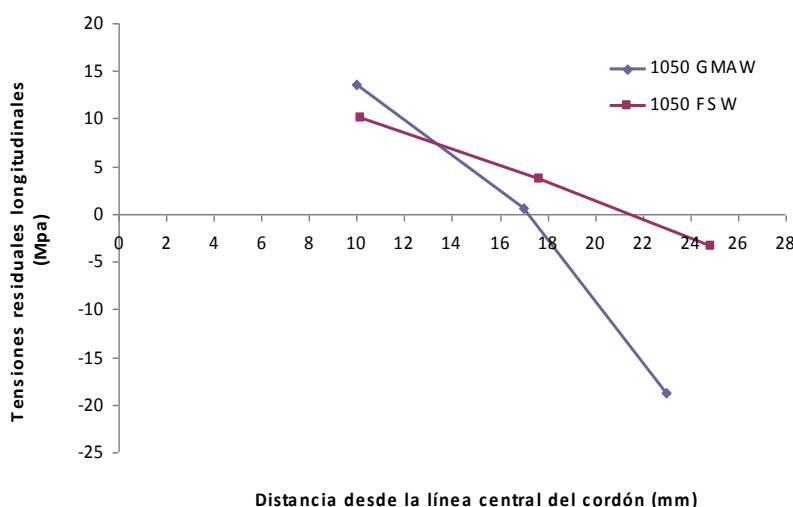


Figura 8. Tensiones residuales longitudinales en función de la distancia a la LC para AA1050 GMAW y FSW.

Los resultados obtenidos por el método del seccionamiento fueron satisfactorios, obteniendo un perfil aproximado del gradiente de tensiones residuales longitudinales, consistentes con lo reportado en la literatura para uniones soldadas similares [6,7]. Estos valores fueron inferiores a los estimados mediante la técnica HD para la posición de 20 mm desde la LC.

Como puede verse se tiene que en la zona cercana al borde del cordón las tensiones residuales en la dirección longitudinal, son de tracción, asociadas a los gradientes térmicos sufridos por el material durante la soldadura. Al alejarse de la zona del cordón dichas tensiones de tracción disminuyen, hasta que a una dada distancia se produce la inversión del signo de las mismas pasando a tensiones de compresión debido a que el cuerpo debe encontrarse en equilibrio. Este gradiente de tensiones residuales es habitual en soldadura, siendo de interés la magnitud y la posición de las tensiones máximas de tracción y compresión, así como la ubicación del cambio de signo. La tensión de tracción máxima medida para GMAW (13,6 MPa) fue alrededor de un 35 % mayor que la determinada para FSW (10 MPa), en posiciones similares. La mínima tensión de compresión medida para GMAW (-18,5MPa) fue aproximadamente 5 veces superior a la medida para posiciones similares en FSW. El cambio de signo se produce a una mayor distancia de la línea central del cordón para FSW (21 mm) que para GMAW (17 mm). El gradiente de tensiones para FSW fue de aproximadamente 0,9 MPa/mm, mientras que para GMAW fue de alrededor de 2,5 MPa/mm, casi tres veces superior, en el rango de distancias medido. Este mayor gradiente de tensiones se asocia al mayor gradiente térmico que tiene lugar en el proceso de soldadura por fusión. En este sentido la temperatura máxima alcanzada durante la soldadura por FSW no supera los 450-550°C.

Puede verse que para el proceso GMAW el valor de las tensiones máximas medidas de tracción y compresión es mayor que para el caso del proceso FSW, siendo consecuentemente mayor el gradiente de tensiones y la distancia para la inversión del signo de las tensiones.

Como era de esperar, las máximas tensiones de tracción y compresión longitudinales obtenidas por GMAW fueron un 30% y 370% mayor, respectivamente, que las obtenidas por FSW. Además se puede apreciar que

el cambio de signo de las tensiones se produce a los 17 mm desde el centro de soldadura, mientras que en FSW se encontraba aproximadamente a 20mm, es decir, hay un mayor gradiente de tensiones. En la Figura 9 se pueden observar los resultados obtenidos mediante la técnica de seccionamiento de la medición de tensiones residuales longitudinales en función de la distancia a la línea central del cordón, para el AA5052 en ambos procesos de soldadura analizados.

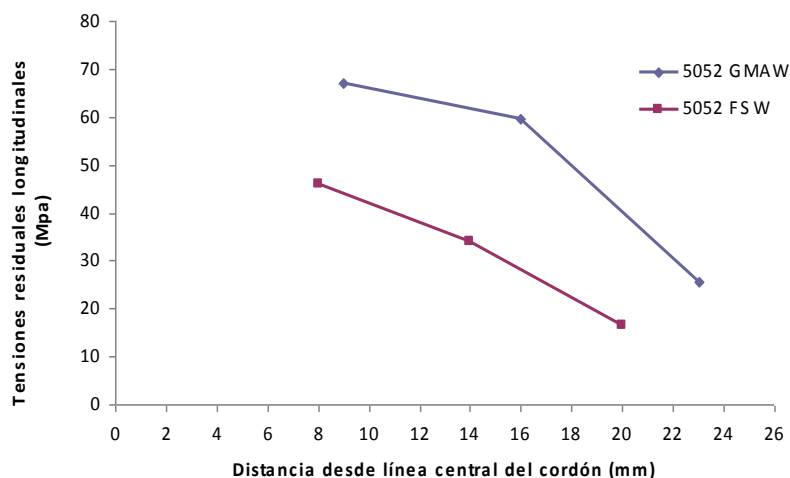


Figura 9. Tensiones residuales longitudinales en función de la distancia a la LC para AA5052 GMAW y FSW.

En este caso los valores de tensiones residuales longitudinales fueron superiores a los determinados para el 1050, no alcanzándose en el rango de distancias medidas el cambio de signo de dichas tensiones. En promedio las tensiones medidas para GMAW fueron un 58% superior a las obtenidas para FSW. Los gradientes de tensiones fueron similares, aunque el medido para el proceso GMAW (-3,0 MPa/mm) fue superior al del proceso FSW (-2,4MPa/mm). En este sentido ambos fueron superiores a lo determinado para el 1050, particularmente para el proceso FSW.

3.3 Metodo de seccionamiento con roseta

En la Figura 10 se observan los resultados obtenidos de la medición de tensiones residuales por seccionamiento en la zona del cordón de soldadura de las probetas de AA1050 soldadas por GMAW y FSW.

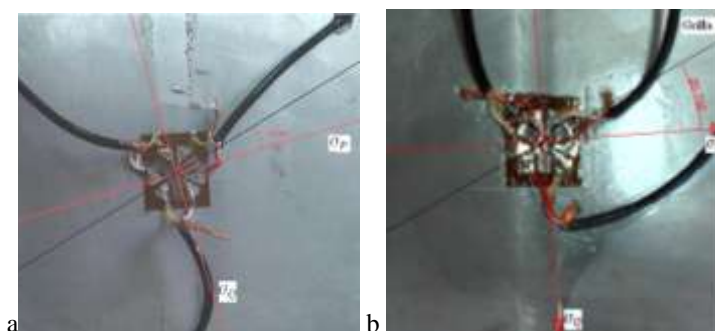


Figura 10. Tensiones residuales mediante S con roseta delta sobre: a- cordón GMAW-1050, b- cordón FSW-1050.

Las tensiones principales obtenidas sobre el cordón de la soldadura FSW-1050 fueron $\sigma_p = -0,9$ MPa y $\sigma_q = 13,8$ MPa. Para el caso de la soldadura GMAW, las tensiones principales obtenidas sobre el cordón fueron $\sigma_p = 3,7$ MPa y $\sigma_q = 21,7$ MPa. Estos resultados son consistentes con los determinados anteriormente con los extensómetros lineales, donde para la probeta FSW-1050, para la dirección longitudinal la tensión residual medida a 10 mm de la línea central del cordón fue de 10 MPa, siendo en este caso aproximadamente 13 MPa sobre la línea central del cordón. Asimismo, para la probeta GMAW-1050, para la dirección longitudinal, la tensión medida a 10 mm de la línea central del cordón fue de 13,6 MPa, siendo en este caso aproximadamente 20 MPa sobre la línea central del cordón. Dado que las tensiones residuales crecen hacia el centro del cordón, consistentemente con lo determinado anteriormente. Los resultados obtenidos muestran nuevamente el mayor nivel de tensiones residuales introducidas mediante el proceso GMAW (22% σ_y)

respecto del procesos FSW (14% σ_y). A su vez, esta técnica muestra ser aplicable para la medición de tensiones residuales.

Los valores obtenidos mediante las técnicas de seccionamiento son inferiores a los obtenidos por el método de agujero ciego. Asimismo, se ha reportado previamente que el método de agujero ciego provee valores superiores a los de la técnica de seccionamiento, entregando este último, valores promedio de las tensiones residuales [1].

3.4 Macrografías

En la Figura 11 se pueden ver macrografías del aluminio AA 1050 soldado por FSW y GMAW.

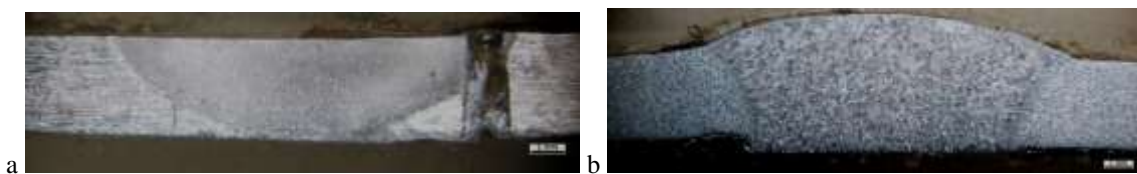


Figura 11. Macrografías de AA1050 soldado por: a-FSW, b- GMAW.

Como puede verse ambas probetas presentan penetración completa y no se observa ningún tipo de defectos tipo porosidad, fisuración, etc. En la Figura 11a se puede ver la ubicación del orificio de agujero ciego realizado en el borde el cordón. Asimismo puede evaluarse el ancho de ambos cordones de soldadura.

4. CONCLUSIONES

Las tensiones residuales introducidas durante la soldadura mediante el proceso GMAW sobre probetas de aluminio AA1050 y AA5052 fueron significativamente mayores (30-50%) que las generadas por el proceso de soldadura por FSW, para todas las técnicas de medición empleadas. Asimismo, se detectaron mayores gradientes de tensiones longitudinales para el proceso GMAW.

Las mediciones realizadas por el método de seccionamiento fueron similares a las obtenidas para posiciones análogas por el método de agujero ciego, aunque estas últimos entregaron valores mayores. Las mediciones obtenidas mediante la técnica de agujero ciego son aproximadas debido a que dichas tensiones no son uniformes en el espesor y que en ciertos casos los valores medidos superaron el 60% del valor de límite de fluencia del material analizado, pudiendo generar errores en exceso en las mediciones.

5. REFERENCIAS

1. L. Fratini and Bernardo Zuccarello, "An analysis of through-thickness residual stresses in aluminium FSW butt joints", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46 (2006), p. 611–619.
2. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*, Edited by G. Totten, M. Howes, T. Inoue, ASM, 2002, 477 p.
3. *Welding Handbook*, Vol. 1, 9th Edition, AWS, 2001, 918 p.
4. ASTM E-837-01, "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method", ASTM, 2001.
5. Application Note B-129-8, "Surface preparation for strain gage bonding", Vishay Micro –Measurements, 2009.
6. P. Moreira, V. Richter-Trummer, R. da Silva, M. de Figueiredo, P. de Castro, "Residual stress evaluation of a MIG butt welded aluminum alloy plate", *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões*, Vol. 17 (2009), p. 29-39.
7. H. Lombard, D.G. Hattingh, A. Steuwer, M.N. James, "Effect of process parameters on the residual stresses in AA5083-H321 friction stir welds", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 501 (2009), p. 119–124.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo desean agradecer a INTI-Mecánica y a la Universidad de Buenos Aires por el apoyo económico prestado para el desarrollo del mismo, así como a Gustavo Lafogiannis (INTI-Mecánica) y al personal del Laboratorio de Materiales y Estructuras de la FIUBA.