

18. Ciencia e ingeniería de materiales.

Presentación de las técnicas empleadas para el análisis del desempeño a fatiga de soldaduras PFSSW en chapas de acero al carbono

Autor: Lombardo, Gianluca ⁽¹⁾; glombardo@comunidad.unnoba.edu.ar

Co-autor(es): Mateos, Alejandro ⁽¹⁾; Castillo, María José ⁽¹⁾.

Orientador/a: Chapetti, Mirco Daniel ⁽²⁾; mchapetti@fi.mdp.edu.ar

(1) Universidad Nacional del Noroeste de la provincia de Buenos Aires / Laboratorio de Ensayos de Materiales y Estructuras / Comisión de investigaciones científicas de la provincia de Buenos Aires - LEMEJ - CIC.

(2) Laboratorio de Mecánica Experimental (LABMEX), Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA), Universidad Nacional de Mar del Plata – CONICET, Mar del Plata, Argentina.

Resumen

En los últimos años, el interés de la industria automotriz por reducir el consumo de combustible e impacto ambiental, ha puesto en primer plano el desarrollo de técnicas que permitan emplear materiales más ligeros y resistentes. Los aceros Dual Phase (DP) presentan mejor conformabilidad y desempeño al impacto que los aceros convencionales utilizados en la fabricación de carrocerías. Éstos en general poseen bajo contenido de carbono y por medio de tratamiento térmicos específicos se le introducen microestructuras compuestas por islas de martensita contenidas en una matriz ferrítica, dando lugar a propiedades mecánicas controladas por su tamaño y fracción en volumen. Actualmente, la soldadura de puntos por resistencia (RSW: Resistance Spot Welding) es el proceso más utilizado en la industria automotriz. Sin embargo, la unión de aceros DP requiere de altas corrientes eléctricas, que pueden ocasionar un ablandamiento en la Zona Afectada por el Calor comprometiendo el desempeño mecánico de la unión. Como alternativa, surge el proceso de soldadura por puntos de fricción agitación con proyección (PFSSW: Projection Friction Stir Spot Welding). El objetivo de este trabajo es entender y optimizar el desempeño a fatiga de uniones PFSSW en chapas de acero DP, mecanismo de daño crítico en la integridad mecánica de este tipo de unión. En primera instancia, se comenzó con ensayos a fractura por fatiga de uniones soldadas PFSSW de chapas de acero SAE 1010, a efectos de avanzar en el entendimiento del proceso integral de daño por fatiga en este tipo de unión, e identificar los mecanismos predominantes y etapas involucradas. Se realizaron ensayos dinámicos a diferentes niveles de rango de tensiones con una relación de carga $R = 0,1$ y frecuencia de ciclado de 5 Hz.

Palabras clave: Fatiga de uniones soldadas por PFSSW, Resistencia a fatiga, Aceros.

Introducción

En los últimos años, el interés de la industria automotriz en mejorar el desempeño en seguridad, reducir el consumo de combustible e impacto ambiental de los vehículos ha creado la necesidad de desarrollar aplicaciones que implementen materiales más ligeros y resistentes. En este sentido, la industria del acero ha desarrollado los Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS: Advanced High Strength Steels) caracterizados por una mejor conformabilidad y desempeño al impacto que los aceros convencionales (Kuziak, 2008; ULSAB-AVC, 2001).

Dentro de la clasificación de AHSS se encuentran los aceros de Doble Fase (DP: Dual Phase) que presentan una alta resistencia combinada con un gran potencial de absorción de energía de las cargas dinámicas que ocurren durante el choque de vehículos (Kuziak, 2008).

Los aceros DP en general poseen bajo contenido de carbono y por medio de tratamiento térmicos específicos se le introducen microestructuras compuestas por islas de martensita contenidas en una matriz ferrítica, dando lugar a propiedades mecánicas controladas por su tamaño y fracción en volumen. Este tipo de microestructura permite obtener aceros DP con tensiones de rotura en el rango de los

500 a 1200 MPa. Además, presentan un alto endurecimiento por deformación, especialmente en el comienzo de la zona plástica; exhibiendo una excelente resistencia al crecimiento de fisuras por fatiga en tasas cercanas al umbral de propagación.

La soldadura de puntos por resistencia (RSW: Resistance Spot Welding) es el proceso más utilizado para la producción de los componentes de las carrocerías de automóviles. Este proceso se caracteriza por su rapidez, automatización, economía y producir uniones sin necesidad de material de aporte (Janota, 2007). Sin embargo, este proceso resulta inadecuado para la producción de puntos de soldadura en aceros DP debido a:

- La necesidad de implementar corrientes eléctricas más elevadas para la producción de uniones de calidad (Nayak, 2012).
- No es posible realizar un contacto completo entre las chapas a soldar debido al efecto “Spring Back” (Kumar, 2012).
- La existencia de cambios microestructurales en la Zona Afectada por el Calor (ZAC) puede modificar considerablemente la resistencia de la unión soldada (Nayak, 2012; Kumar, 2012; Nikoosohbat, 2010).
- La implementación de grandes

corrientes de soldadura puede ocasionar expulsiones e improntas profundas producidas por el electrodo que reducen la capacidad de carga y absorción de energía de la unión (Nikoosohbat, 2010).

Como alternativa a RSW, surge el proceso de soldadura por puntos de fricción agitación con proyección (PFSSW: Projection Friction Stir Spot Welding). Esta novedosa técnica de soldadura, presentada inicialmente por S.M. Mousavizade (2019), deriva de la técnica de soldadura por puntos de fricción agitación (FSSW: Friction Stir Spot Welding) desarrollada e implementada en componentes de carrocerías por Mazda Motor Corporation (Sakano, 2001; Iwashita, 2003).

La soldadura por PFSSW es una técnica de soldadura en estado sólido que, respecto a FSSW, emplea una herramienta sin pin (solo con hombro) y un soporte posterior con una proyección estática, generalmente de menor diámetro que el de la herramienta que tiene por objetivo alterar el flujo de material plastificado. Debido a esta característica del proceso PFSSW, el tiempo de duración de la herramienta es mayor y produce uniones soldadas sin la presencia de indentaciones o “key hole” y con características estéticas comparables a las uniones RSW. Por otra

parte, la implementación de PFSSW en la unión de chapas de aceros al carbono por parte de los investigadores S.M. Mousavizade (2019) y A. Mateos (2021; 2022) ha demostrado su potencialidad en su uso para la fabricación de uniones en componentes automotrices.

En la Figura 1, se presenta un esquema del proceso PFSSW. La secuencia de soldadura consta de 4 pasos:

- La herramienta giratoria entra en contacto las piezas solapadas produciendo un calentamiento por fricción.
- Seguidamente, la herramienta se sumerge agitando el material plastificado.
- La herramienta se mantiene girando en la profundidad especificada durante un intervalo de tiempo determinado.
- Por último, la herramienta retorna a su posición inicial, conformando la unión soldada.

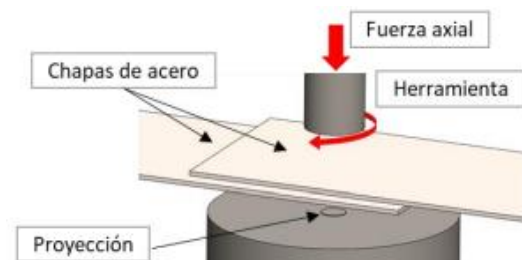


Figura 1: Esquema de funcionamiento del proceso PFSSW.

El desempeño estructural de un vehículo depende en gran parte de la integridad de las uniones soldadas, por lo que es necesario comprender las características mecánicas de los puntos de soldadura PFSSW para su aplicación en la industria automotriz. Por otra parte, la mayoría de los componentes automotrices se encuentran sometidos en servicio a cargas de fatiga, por lo que, resulta esencial estudiar el comportamiento de los mismos a carga cíclicas. A pesar de ello, los estudios sobre modos de falla y desempeño a fatiga de este tipo de uniones son escasos. Algunos autores han investigado los modos de falla y vida a fatiga de uniones convencionales FSSW en aleaciones de aluminio (Lin, 2008a; Lin, 2008b) mientras que, se han realizado estudios acerca de la influencia de los parámetros de soldadura RFSSW (Refill Friction Stir Spot Welding, otra variante de la técnica FSSW) en el desempeño mecánico bajo ensayos estáticos y dinámicos en uniones de chapas de aleaciones de aluminio y de magnesio (Venukumar, 2014; Uematsu, 2008; Shen, 2015; Shen, 2016). Por el contrario, no se ha reportado bibliografía acerca del desempeño dinámico de uniones de chapas de acero DP mediante la técnica PFSSW.

Objetivos

El objetivo de este trabajo es comprender y optimizar el desempeño a fatiga de uniones PFSSW en chapas de acero DP, siendo un mecanismo de daño crítico en la integridad mecánica de este tipo de unión.

Materiales y Métodos

En primera instancia, se comenzó con un ensayo exploratorio a fractura por fatiga de uniones soldadas PFSSW de chapas de acero SAE 1010, a efectos de avanzar en el entendimiento del proceso integral de daño por fatiga en este tipo de unión, e identificar los mecanismos predominantes y etapas involucradas para la planificación de ensayos a distintos rangos de tensiones que permitan conocer su curva S/N.

El punto de soldadura PFSSW se realizó conforme la norma American Welding Society, AWS - D8.1M:2013. “Specification for automotive weld quality - resistance spot welding of steel” (AWS, 2013) en chapas de acero al carbono laminado en caliente de espesor 0,91 mm cuya composición química y propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 1 (Mateos, 2021).

Composición Química		
C	Mn	Si
0,06	0,25	<0,01
P	S	Cr
0,016	0,013	0,02

Ni	Mo	Ceq
0,02	<0,01	0,107
Propiedades mecánicas		
Resistencia proporcional [Rp]	157 MPa	
Resistencia máxima [Rm]	303 MPa	
Elongación [A%]	45,20%	
Dureza [HV100]	110,4	

Tabla 1: Composición química del material base.

Para realizar la unión PFSSW se utilizó una fresadora CNC universal de 3 ejes modelo Mecatronic con una potencia de husillo de 3 HP y una celda de carga vinculada a la mesa de trabajo de 25 kN con indicador EL-05B para el registro de la carga axial aplicada por el husillo. La Figura 2 muestra la configuración utilizada. Los parámetros de soldadura utilizados se muestran en la Tabla 2.

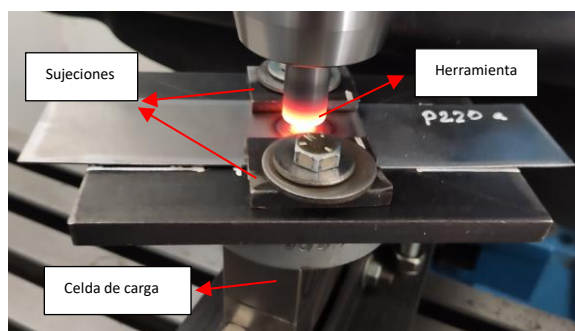


Figura 2: Ejecución de soldadura.

Parámetros de soldadura	
Herramienta	Plana
Velocidad de giro [RPM]	3000
Diámetro Herramienta [mm]	16
Velocidad de avance [mm/min]	8

Proyección [mm]	0,6
Diámetro Proyección [mm]	10
Precarga kg	10

Tabla 2: Parámetros de soldadura PFSSW.

El ensayo de fatiga se llevó a cabo en una máquina servohidráulica marca MTS de 50 kN con control de carga (Figura 3). La probeta se sujetó en las mordazas de ensayo mediante el uso de 4 prisioneros y chapas del mismo espesor para la compensación del offset debido a la unión de solape (Figura 4). Los parámetros de ensayo a fatiga se determinaron a partir de la carga a fluencia de 4000 N y carga de rotura de 5502 N para este tipo de unión, optando por comenzar con una carga máxima al 70% respecto de la proporcional, los parámetros de ensayo se muestran en la Tabla 3. Luego del ensayo de fatiga, se realizaron macrografías de la zona de fractura.



Figura 3: Equipo de ensayos dinámicos MTS.

Carga Máx [N]	Carga Mín [N]	Frecuencia [Hz]	R [Carga mín/Carga Máx]
2865	235	5	0,08

Tabla 3: Parámetros del ensayo a fatiga.

Resultados y Discusión

La Figura 4 muestra una vista superior de la unión soldada sin ensayar dónde se puede observar la indentación de la herramienta, mientras que la Figura 5 corresponde a la vista trasera y a la indentación de la proyección.

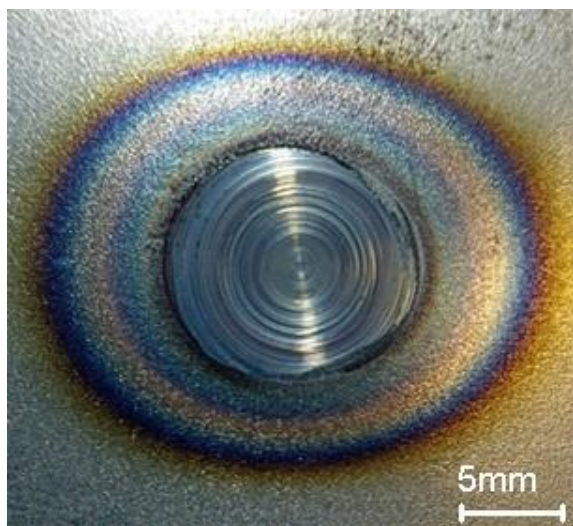


Figura 4: Indentación de la herramienta.

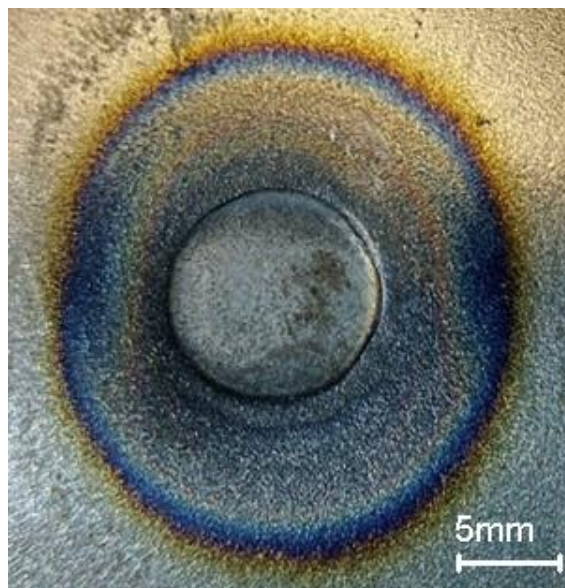


Figura 5: Indentación de la proyección.

Con respecto al ensayo de fatiga, la falla del punto de soldadura ocurrió a los 29.930 ciclos, la Figura 6 muestra la rotura de la unión en el dispositivo de ensayo.

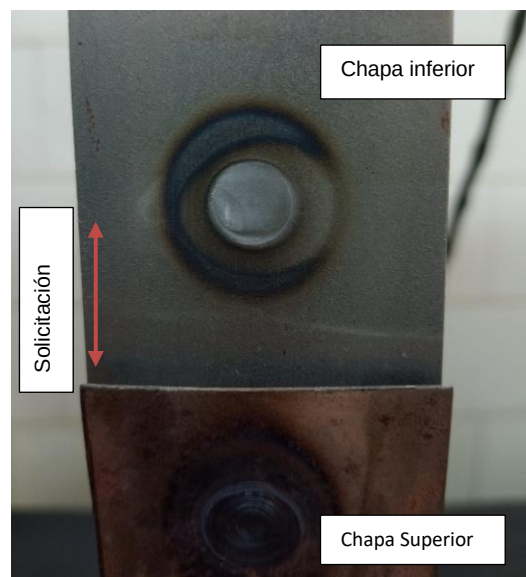


Figura 6: Foto de la rotura de la unión.

La Figura 7 muestra una macrografía de la zona de fractura de la chapa inferior,

mientras que la Figura 8 corresponde a la chapa superior, donde se puede observar un modo de falla interfacial.

Las uniones por puntos (RSW, FSSW y sus variantes, unión de remaches) presentan diferentes modos de falla dependientes del rango de tensiones aplicadas durante el ensayo de fatiga (Kumar. 2012; Nikoosohbat, 2010; Lin, 2008a; Lin 2008b; Malafaia, 2010; Yapici, 2021; Kubit, 2020; Uetmatsu, 2009). El modo de falla más común en altos rangos de tensiones, es la fractura interfacial. Este mecanismo de daño se origina debido a que las grandes tensiones aplicadas proporcionan la energía necesaria para que, por efecto de concentración de tensiones, la punta de la interface entre las chapas en la zona de unión se comporte como una prefisura y se propague hacia el metal de soldadura como se ilustra en la Figura 9, produciendo la fractura estática por corte cuando la superficie remanente no es capaz de soportar el esfuerzo aplicado (rotura estática indicada en Figura 7 y 8). Los ensayos de fatiga realizados por T. Kumar (2012) en uniones de aceros DP 780 mediante RSW a rango de tensiones por encima del 60% de la carga de fluencia, presentaron una falla por fatiga interfacial entre chapas, dando indicios de que podría tratarse de mecanismos de daños comparables.

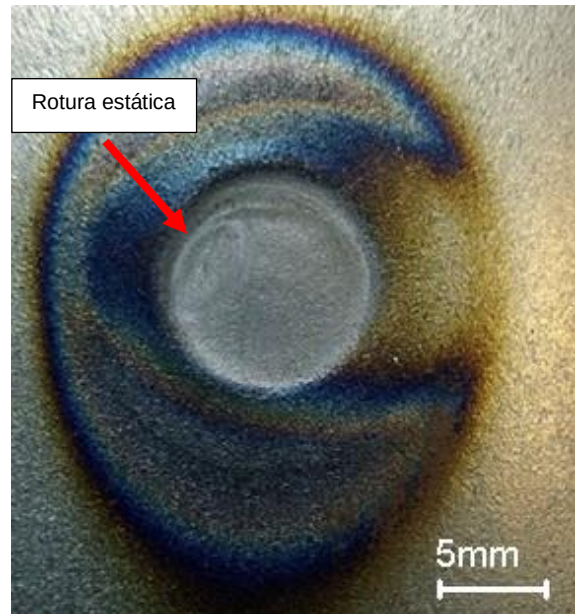


Figura 7: Zona de fractura chapa inferior.

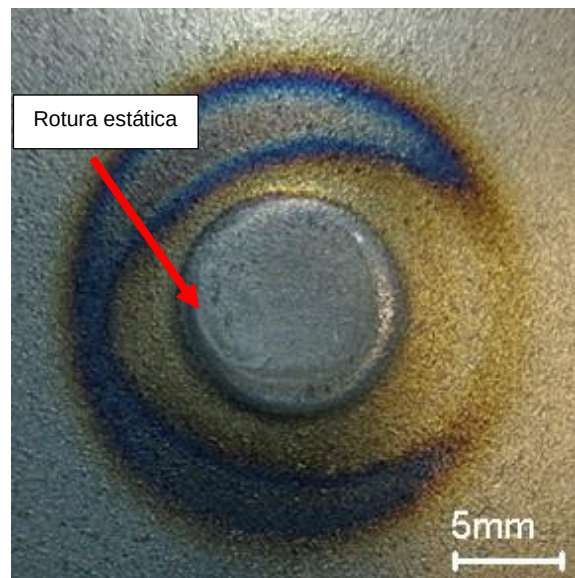


Figura 8: Zona de fractura chapa superior.

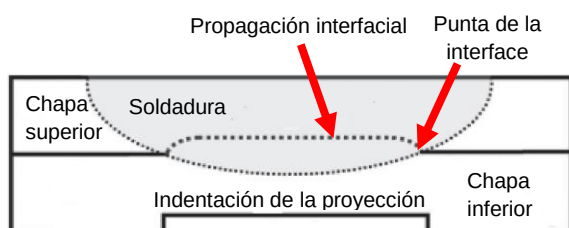


Figura 9: Esquema de iniciación y propagación de fisura.

Conclusiones

Se llevó a cabo un ensayo de fatiga exploratorio que permitirá la planificación de ensayos a diferentes niveles de tensión con el fin de conocer el comportamiento a fatiga y los mecanismos de daño involucrados en soldaduras PFSSW en aceros DP a lo largo de su curva S/N, objeto de estudio de esta tesis doctoral. Asimismo, permitió familiarizarse con las técnicas de ensayos y análisis empleadas en las pruebas a fatiga.

Referencias Bibliográficas

- [1]. R. Kuziak et al, (2008). Advanced High Strength Steels for automotive industry. Archives of civil and mechanical engineering, vol 8(2), pp. 104 – 117.
- [2]. ULSAB-AVC. (2001). Body Structure Materials, Technical Transfer Dispatch No. 6, May, 2001.
- [3]. Janota, M. y Neumann, H. (2007). “Share of Spot Welding and other Joining Methods in Automotive Production,” IIW-IIS, Document III-1423-07.
- [4]. S.S. Nayak, E. Biro, y Y. Zhou. (2012). Resistance Spot Welding of Dual-phase Steels: Heat affected zone softening and tensile properties, ASM Proceedings of the International Conference: Trends in Welding Research.
- [5]. T. Kumar y K. Bhowmick. (2012). Resistance Spot Welding Characteristics and High Cycle Fatigue Behavior of DP 780 Steel Sheet. Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 21(2), pp. 280-285.
- [6]. F. Nikoosohbat et al. (2010). Microstructure and failure behavior of resistance spot welded DP980 dual phase steel, Materials Science and Technology, vol. 26, no. 6, pp. 738–744.
- [7]. S.M. Mousavizade y M. Pouranvari. (2019). Projection friction stir spot welding: a pathway to produce strong keyhole-free welds, Science and Technology of Welding and Joining, vol. 24, no. 3, pp. 256–262.
- [8]. R. Sakano, et al. (2001). Development of spot FSW robot system for automobile body members, 3rd international symposium of friction stir welding.

- [9]. T. Iwashita. (2003). Method and apparatus for joining, US Patent 6601751 B.
- [10]. A. Mateos et al. (2021). Puesta a punto de la técnica de soldadura por fricción agitación de puntos con proyección. 5to Congreso Argentino de la Ingeniería, CADI.
- [11]. A. Mateos et al. (2022). Análisis de las velocidades de descenso y rotación en el desempeño de la soldadura por fricción agitación por puntos con proyección. 20° Congreso Internacional de Materiales SAM – CONAMET.
- [12]. P. Lin, et al. (2008a). Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 6111-T4 sheets. Part 1: Welds made by a concave tool, International Journal of Fatigue, vol. 30, no. 1, pp. 74–89.
- [13]. P. Lin, et al. (2008b). Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 6111-T4 sheets. Part 2: Welds made by a flat tool, International Journal of Fatigue, vol. 30, no. 1, pp. 90–105.
- [14]. S. Venukumar, et al. (2014). Failure modes and fatigue behavior of conventional and refilled friction stir spot welds in AA 6061-T6 sheets, International Journal of Fatigue, vol. 61, pp. 93–100.
- [15]. Y. Uematsu, et al. (2008). Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behavior of friction stir spot welded joints in Al–Mg–Si alloy, International Journal of Fatigue, vol. 30, no. 10–11, pp. 1956–1966.
- [16]. Z. Shen, et al. (2015). Influence of processing parameters on microstructure and mechanical performance of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy, Science and Technology of Welding and Joining, vol. 20, no. 1, pp. 48–57.
- [17]. Z. Shen, et al. (2016). “Comparison of fatigue behavior in Mg/Mg similar and Mg/steel dissimilar refill friction stir spot welds,” International Journal of Fatigue, vol. 92, pp. 78–86.
- [18]. American Welding Society, AWS - D8.1M:2013. Specification for automotive weld quality - resistance spot welding of steel.
- [19]. A.M.S, Malafaia et al. (2010) Fatigue behavior of friction stir spot welding and riveted joints in an Al alloy. Procedia Engineering 2, pp. 1815 - 1821.
- [20]. G.G Yapici y I.J. Ibrahim. (2021). On the fatigue and fracture behavior of keyholefree friction stir spot welded joints in an aluminum alloy. Journal of materials research and technology, vol

11, pp. 40 – 49.

- [21]. A. Kubit et al. (2020). Fatigue Life Assessment of Refill Friction Stir Spot Welded Alclad 7075-T6 Aluminium Alloy Joints. Metals, vol 10, pp 1 - 18.
- [22]. Y. Uematsu y K. Tokaji. (2009). Comparison of fatigue behaviour between resistance spot and friction stir spot welded aluminium alloy sheets. Science and technology of welding and joining, vol 14(1), pp. 62 - 71.

Agradecimientos

Al Laboratorio de Ensayos de Materiales y Estructuras – LEMEJ por el apoyo incondicional para la realización de este trabajo.

A la Escuela de Educación Secundaria Técnica, EEST N°1 de la ciudad de Junín por brindar el equipamiento para el ensayo a fatiga.

Al Laboratorio de Mecánica Experimental, LABMEX por su guía durante la realización del trabajo.