

Análisis de las técnicas de ensayos utilizadas en soldaduras por puntos en fase sólida aplicadas al desempeño a fatiga

Analysis of testing techniques used in solid-state spot welding applied to fatigue behavior

Presentación: 22/10/2023

Gianluca, Lombardo

Laboratorio de Ensayos de Materiales y Estructuras (LEMEJ) – Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires – CIC, Junín, Argentina.
glombardo@comunidad.unnoba.edu.ar

Alejandro Andrés, Mateos

Laboratorio de Ensayos de Materiales y Estructuras (LEMEJ) – Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires – CIC, Junín, Argentina.
hmbaeza@comunidad.unnoba.edu.ar

María José, Castillo

Laboratorio de Ensayos de Materiales y Estructuras (LEMEJ) – Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires – CIC, Junín, Argentina.
DEYTEMA – Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional San Nicolás, San Nicolás, Buenos Aires, Argentina.
mariajose.castillo@nexo.unnoba.edu.ar

Mirco Daniel, Chapetti

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.
mchapetti@fi.mdp.edu.ar

Resumen

En el presente trabajo se realiza una revisión bibliográfica acerca del comportamiento mecánico de uniones soldadas mediante procesos de soldadura por puntos de fase sólida. El objetivo de esta revisión es conocer la metodología empleada para el análisis de uniones de la gama de soldaduras en fase sólida libres de improntas de soldadura (keyhole) con el fin de establecer las técnicas más efectivas para la caracterización del desempeño a fatiga de uniones PFSSW en aceros Dual Phase. Para ello se presentan las metodologías utilizadas y resultados por autores que han trabajado con uniones “free keyhole” realizadas por variantes del proceso FSSW.

Palabras clave: Fatiga de uniones soldadas, soldadura de puntos por fricción agitación.

Abstract

In this work a review of mechanical behavior of welded joints using solid-phase spot welding processes is carried out. The aim of this review is to establish the most effective techniques used for analysis of free keyhole solid phase spots welds in order to establish the methodology for the fatigue characterization of PFSSW joints doing in Dual Phase steel sheets. Methodologies and results by authors who have worked with free keyhole welds made by variants of FSSW process are presented.

Keywords: Fatigue, Solid-phase spots welds, Friction stir spot welding, Dual Phase.

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 generado la necesidad de desarrollar aplicaciones que implementen materiales más ligeros y resistentes, como aceros avanzados de alta resistencia, aleaciones de aluminio y de magnesio (Uematsu, 2008). El creciente interés en la implementación de estos materiales, ha puesto en primer plano el desarrollo de nuevas técnicas de unión adecuadas para la fabricación de componentes.

Entre los aceros avanzados de alta resistencia se encuentran los aceros Dual Phase (DP) que se caracterizan por presentar mejor conformabilidad y desempeño al impacto con respecto a los aceros convencionales. Estos aceros, generalmente de bajo carbono, están constituidos por islas de martensita contenidas en una matriz ferrítica, y sus propiedades mecánicas son controladas por el tamaño y fracción en volumen de las mismas (Kuziak, 2008). Este tipo de microestructura, permite obtener aceros DP con resistencias en el rango de 500 a 1200 MPa y un alto potencial para la absorción de energía. Además, poseen un alto endurecimiento por deformación, especialmente en el comienzo de la zona plástica, exhibiendo una buena resistencia al crecimiento de fisuras por fatigas en cercanías al umbral de propagación.

Actualmente, el proceso más utilizado en la industria automotriz es la soldadura por puntos de resistencia (RSW: Resistance Spot Welding), caracterizándose por su rapidez, automatización, economía y por producir uniones sin necesidad de material de aporte (Janota, 2007). Sin embargo, resulta un proceso inadecuado para la unión de materiales ligeros debido a sus altos costos de operación, gran distorsión térmica y soldaduras de baja resistencia (Florea, 2012; Gean, 1999; Thornton, 1996; Nikoosohbat, 2010; Nayak, 2012). La implementación de RSW para la ejecución de uniones soldadas en aceros DP presenta las siguientes desventajas:

- Necesidad de implementar corrientes eléctricas más elevadas para producir uniones de calidad, resultando en un mayor consumo energético (Nayak, 2012).
- La dificultad de lograr un contacto completo entre las chapas a soldar produce el efecto “Spring Back”.
- El gran aporte de calor produce cambios microestructurales en la Zona Afectada por el Calor (ZAC) que modifican considerablemente la resistencia de la unión (Nikoosohbat, 2010; T. Kumar, 2012).
- Implementar grandes corrientes de soldadura puede ocasionar expulsiones e improntas profundas del electrodo que reducen la capacidad de carga y absorción de energía de la unión (Nikoosohbat, 2010).

Como alternativa a RSW, ha surgido la soldadura de puntos por fricción agitación (FSSW: Friction Stir Spot Welding) que es un proceso de soldadura en fase sólida, con bajo consumo de energía y capaz de producir soldaduras de grano fino y libre de defectos (Nikoosohbat, 2010). El proceso FSSW fue desarrollado e implementado en la fabricación de componentes de carrocerías por Mazda Motor Corporation (Sakano, 2001; Iwashita, 2003). Sin embargo, la mayor desventaja de FSSW es la presencia de un agujero en la zona de soldadura comúnmente denominado keyhole. Por tal motivo, se han desarrollado otras variantes de unión en pos de suprimir la presencia de este tipo de improntas, entre ellas, Projection Friction Stir Spot Welding (PFSSW) y Refill Friction Stir Spot Welding (RFSSW) que presentan alta eficiencia energética, ciclo corto de soldadura y menor consumo de energía en comparación con los métodos de unión por puntos tradicionales como RSW y uniones remachadas.

La mayoría de los componentes utilizados en la industria automotriz se encuentran sometidos en servicio a cargas de fatiga, por lo que, resulta esencial estudiar el comportamiento de los mismos a carga cíclicas (Venukumar, 2014). 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 en el desempeño mecánico bajo ensayos estáticos y dinámicos de las uniones (Uematsu, 2008; Venukumar, 2014; Shen, 2015; Shen, 2016).

El objetivo de este trabajo es presentar una revisión bibliográfica sobre las soldaduras por puntos en fase sólida sin keyhole con el fin de establecer la metodología a utilizar para la caracterización del desempeño a fatiga de uniones PFSSW en aceros DP.

Desarrollo

Friction Stir Spot Welding.

La soldadura de puntos por fricción agitación es una técnica que deriva de la soldadura por fricción (FSW: Friction Stir Welding) patentada por The Welding Institute en 1991 (Thomas, 1995). FSSW es un proceso de soldadura en fase sólida que utiliza una herramienta giratoria con dos partes principales: el hombro que se encarga principalmente de generar calor y el pin cuya función es agitar y mezclar el material plastificado. La Figura 1 muestra un esquema del proceso que consta de cuatro etapas: la herramienta comienza a girar a la velocidad de soldadura, el pin se pone en contacto con las piezas a soldar tras la aplicación de una fuerza axial produciendo así un calor por fricción inicial, la herramienta continúa descendiendo y el pin se introduce en el material hasta una profundidad determinada, por último, se retira la herramienta efectivizando la unión.

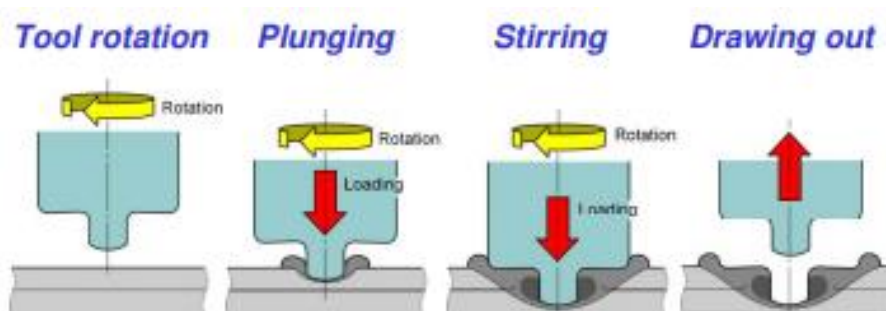


Figura 1: Esquema del proceso de soldadura FSSW.

La Figura 2 muestra una macrografía típica de las uniones FSSW, en donde pueden distinguirse tres zonas metalográficas características: la Zona Agitada (ZA), la Zona Termomecánicamente Afectada (ZTMA) y la Zona Afectada por el Calor (ZAC). La inserción del pin durante la ejecución de la soldadura, produce dos defectos característicos: una impronta característica denominada keyhole y, en cercanía al mismo, una curvatura de la interface entre chapas denominada hook que puede presentar una soldadura parcial.

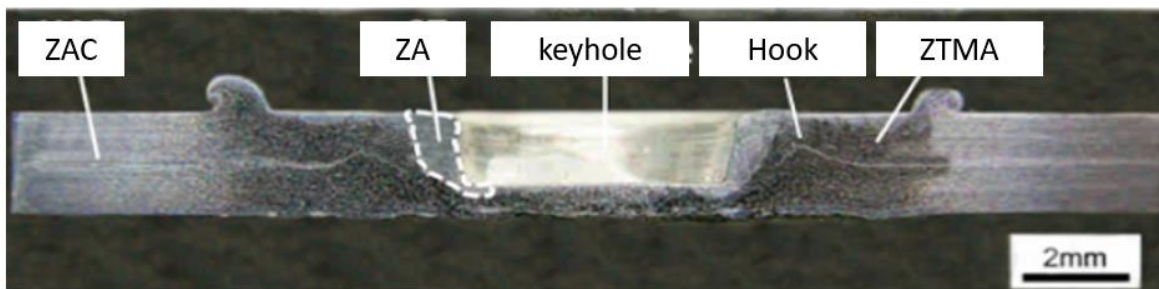


Figura 2: Macrografía típica de una unión FSSW.

La técnica de soldadura FSSW, en los últimos años, ha captado el interés de la industria automotriz debido a que permite obtener soldaduras de calidad en materiales ligeros y resistentes. Sin embargo, el aspecto estético de la soldadura es un factor fundamental, para evitar reprocesos costosos. Algunas desventajas del proceso involucran la corrosión que podría tener lugar en el keyhole debido a la acumulación de agua de lluvia donde la pintura de la carrocería apenas llegaría al fondo (Uematsu, 2008), la presencia inevitable del keyhole en el centro de la unión limita sus aplicaciones. Además, el keyhole es un defecto inherente al proceso FSSW que produce la concentración de tensiones y la reducción del área soldada efectiva que afecta considerablemente el desempeño mecánico en comparación con las técnicas de soldadura por puntos tradicionales (Shen, 2013). La Figura 3 muestra una vista superior de una soldadura por puntos FSSW realizada en chapas de aluminio 6061-T6 donde puede observarse la presencia del keyhole y el reborde perimetral producido por el hombro de la herramienta. En respuesta a lo mencionado anteriormente, la técnica inicial de FSSW ha sufrido variantes que buscan mejorar el desempeño mecánico y estético de las uniones, entre ellos, se encuentran el proceso de

soldadura de puntos por fricción agitación con relleno (RFSSW: Refill Friction Stir Spot Welding) y la soldadura de puntos por fricción agitación con proyección (PFSSW: Projection Friction Stir Welding).

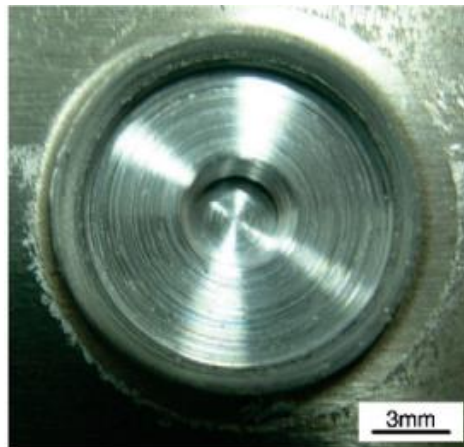


Figura 3: Vista superior de una soldadura FSSW en aluminio 6061-T6 (Wang, 2009).

Variantes RFSSW y PFSSW

La soldadura RFSSW fue desarrollada por GKSS GmbH en 1999 con el objetivo de obtener soldaduras de mayor resistencia en comparación con la técnica FSSW tradicional, incrementando el área soldada efectiva (Shiling, 2002). Trabajos realizados por Y. Uematsu (2008) y J. Prakash (2011) han demostrado que la técnica de relleno del keyhole permite aumentar la resistencia a tracción de las uniones, trabajos más audaces como el de S.L Fox han utilizado la técnica para la reparación de fisuras por fatiga (Fox, 2010).

En la Figura 4 se muestra un esquema del proceso RFSSW, que a diferencia de FSSW, utiliza una herramienta compuesta por tres partes: una abrazadera fija (clamping ring), pin y hombro (sleeve). Además, los tres componentes se accionan mediante tres actuadores montados coaxialmente que comandan los movimientos de giro y desplazamiento axial de manera independiente.

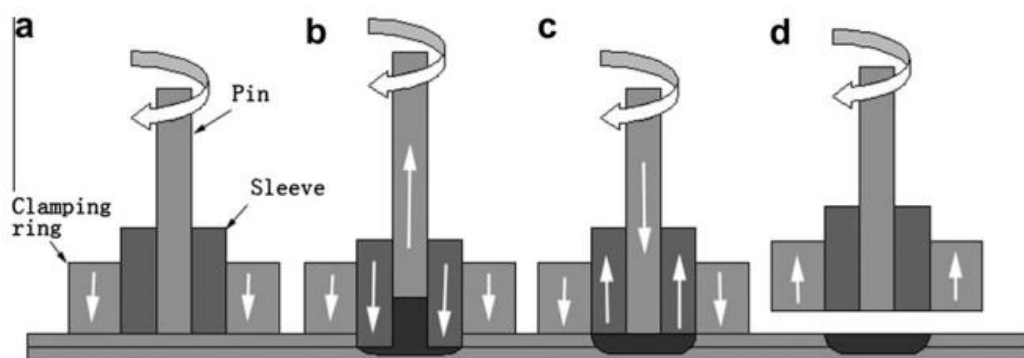


Figura 4: Esquema del proceso RFSSW.

La ejecución de la soldadura consta de 4 pasos fundamentales:

- Con la herramienta en rotación, la abrasadera se posiciona sobre las piezas a soldar con el objetivo de mantener el contacto entre las chapas y evitar que el material plastificado se pierda en forma de rebaba perimetral.
- Seguidamente el hombro se mueve hacia abajo mientras que el pin se desplaza hacia arriba, de esta manera el material plastificado se introduce en la cavidad creada por el movimiento relativo entre el hombro y el pin.

- c. Después de alcanzar una determinada profundidad de penetración, tanto el hombro como el pin vuelven a la posición inicial, generando el rellenado.
- d. Por último, la herramienta se retira produciendo la unión.

La soldadura RFSSW presenta las mismas zonas metalográficas características que el proceso FSSW (Figura 5.A). Tal como se puede ver en la Figura 5.B, la técnica RFSSW produce una unión sin keyhole y sin indentaciones del hombro de la herramienta.

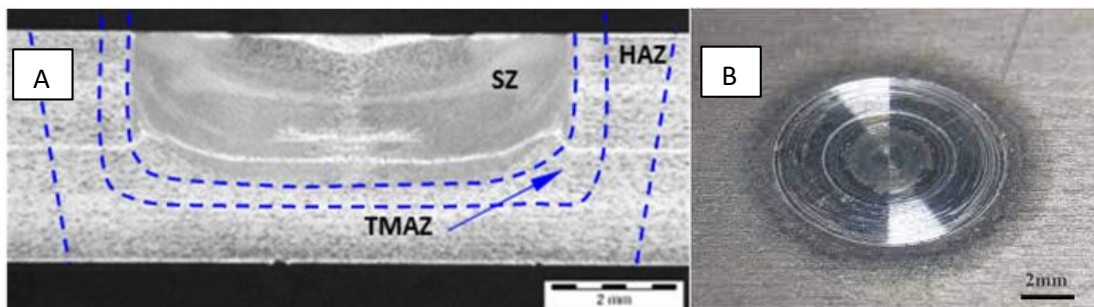


Figura 5: Zonas metalográficas (A) y macrografía (B) de una unión RFSSW (Balasubramaniam, 2021; The Welding Institute).

Otra alternativa fue introducida inicialmente por S.M. Mousavizade (2019) denominada soldadura de puntos por fricción agitación con proyección (PFSSW, Projection Friction Stir Spot Welding). En la Figura 6 se muestra un esquema del proceso, en dónde la unión se produce bajo el mismo funcionamiento que FSSW solo que utilizando una herramienta plana giratoria y una proyección ubicada en un soporte inferior que favorece la mezcla del material plastificado, produciendo así, una unión libre de keyhole (Figura 7.A y 7B). Debido a la presencia de la proyección, la unión soldada presenta una impronta en la parte inferior que generalmente, posee un tamaño ligeramente menor a la altura de la proyección (Figura 7.C).

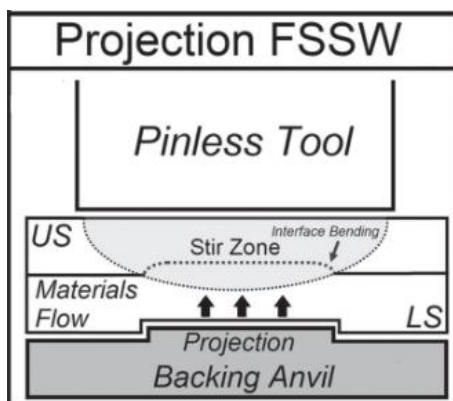


Figura 6: Esquema de la técnica PFSSW.

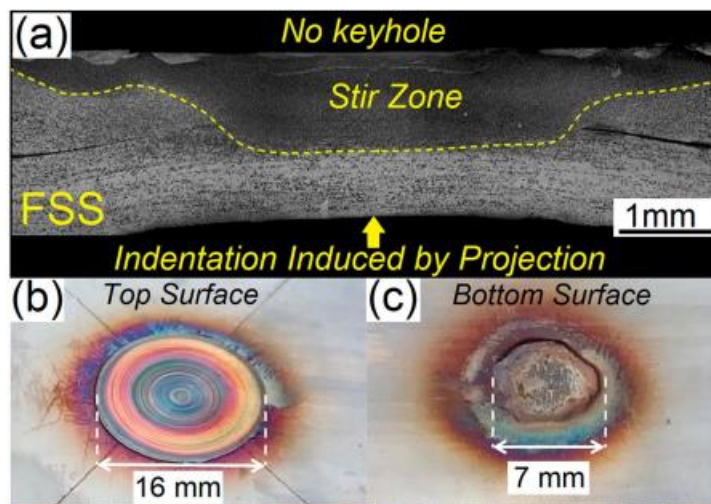


Figura 7: Sección transversal de la soldadura PFSSW (A). Macrográficas de la chapa superior (B) e inferior (C).

El estudio a fatiga de uniones FSSW y RFSSW

Los ensayos de corte por tracción realizados por Y. Uematsu (2008) en una aleación de aluminio Al-Mg-Si, han demostrado que los procesos RFSSW aumentan la resistencia estática de la unión soldada mientras que, la resistencia a fatiga se ve ligeramente disminuida respecto a FSSW. Mientras que los estudios realizados por S.Venukumar (2014) en una aleación AA 6061-T6 demuestran que la tecnología RFSSW aumenta la vida a fatiga de la unión soldada. Además, se observa que las soldaduras FSSW presentaron un modo de falla por corte en todo el rango de ensayos, mientras que, las soldaduras sin keyhole, presentaron tres modos de fallo según las tensiones aplicadas.

Para la ejecución de ensayos de fatiga predomina la utilización de una relación de carga $R = 0,1$ y un límite de fatiga de 1×10^6 ciclos. En general, las uniones FSSW y RFSSW se caracterizan por presentar diferentes modos de fallas a lo largo de la curva S/N a medida que las tensiones aplicadas decrecen, sin embargo, la resistencia a la fatiga para un determinado nivel de tensiones, aumenta en las soldaduras sin keyhole. Los modos de falla más comunes en este tipo de uniones son: falla interfacial a través del metal de soldadura, falla circunferencial con arrancamiento del punto de soldadura (Nugget pull out) y fractura a través del ancho de la chapa en cercanía a la zona de unión (Parent fracture), ilustrados en la Figura 8. Este último es producto de la propagación de fisuras "eyebrow" que se inician en el borde del punto de soldadura y propagan en dirección perpendicular hacia el ancho de la chapa soldada.

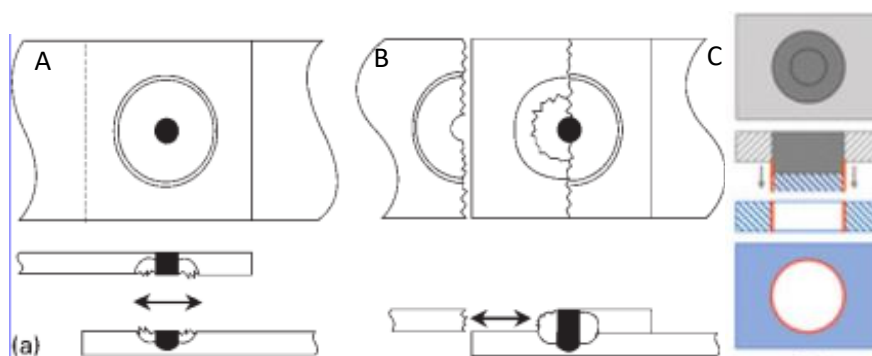


Figura 8: Falla interfacial (A). Parent fracture (B) y Nugget pullo out (C).

Una metodología común en el estudio a fatiga de este tipo de uniones, es la utilización de ensayos interrumpidos con el fin de analizar la evolución de los mecanismos de daño. En su trabajo J.B. Jordon (2010) utiliza ensayos interrumpidos a diferentes porcentajes de la vida a fatiga para un determinado nivel de tensión, además, demuestra la importancia que tiene la concentración de tensiones en la interface entre las chapas y el defecto hook en FSSW en la

iniciación y propagación de fisuras por fatiga, para ello emplea los factores de concentración de tensiones en modo I y modo II (K_I y K_{II} respectivamente).

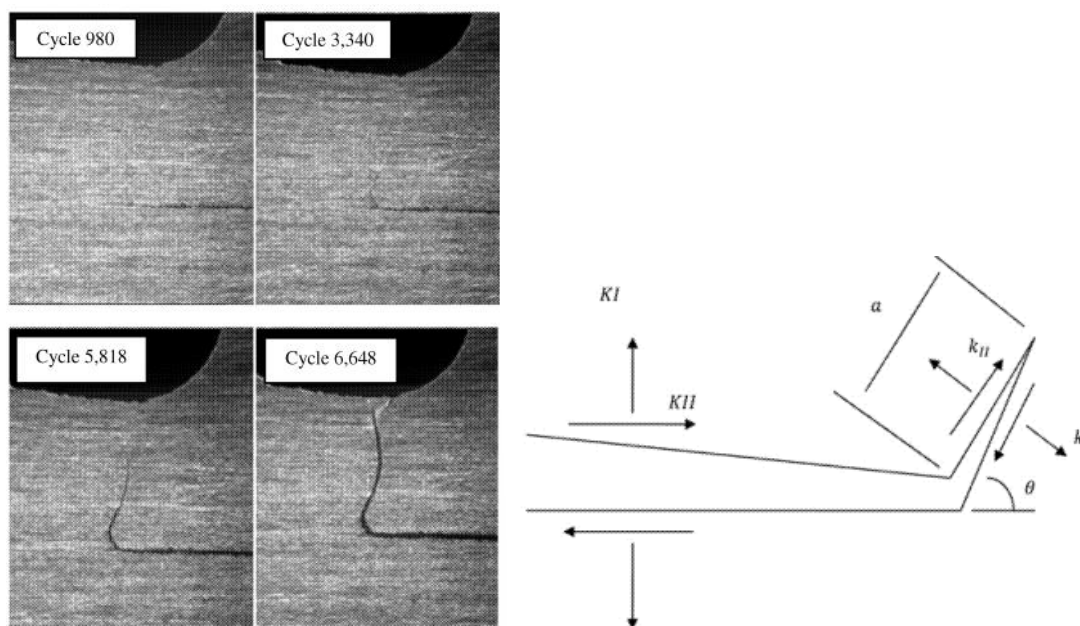


Figura 9: Ensayos interrumpidos (A) y concentración de tensiones en una soldadura FSSW (B).

En lo que respecta a la técnica PFSSW, principalmente se han encontrado trabajos acerca de la caracterización mecánica bajo condiciones estáticas (Venukumar, 2014; Mousavizade, 2019; Mateos, 2022; Mateos, 2021) destacándose la ausencia de trabajos que caractericen el desempeño a fatiga de uniones PFSSW presentándose la necesidad de profundizar en esta área del conocimiento.

Conclusiones

El relevamiento bibliográfico ha permitido conocer la metodología empleada para el análisis y caracterización mecánica de soldaduras de puntos en fase sólida, que requiere el empleo de ensayos dinámicos en frecuencias hasta 10 Hz y una relación de carga comúnmente utilizada de $R = 0,1$, la caracterización metalográfica y análisis fractográfico de la zona de la fractura de la unión. Con el fin de realizar injerencias sobre el proceso de daño y sus etapas, es necesario realizar ensayos interrumpidos que permitan monitorear el crecimiento de las fisuras generadas por fatiga. Asimismo, se ha identificado la necesidad de continuar ampliando el campo de conocimiento sobre el desempeño a fatiga de uniones soldadas en fase sólida, debido a, por un lado, el carácter innovador de los procesos tipo FSSW y, por el otro, a su potencialidad de implementarse en la industria automotriz, siendo necesario establecer metodologías que permitan predecir el comportamiento en servicio de las soldaduras. Por otra parte, se propone avanzar en el entendimiento integral del fenómeno de fatiga mecánica de uniones soldadas por PFSSW en aceros avanzados de alta resistencia Dual Phase cuyo uso ha ganado terreno entre los fabricantes automotrices.

Referencias

- [1]. 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.
- [2]. R. Kuziak, R. Kawalla. (2008). Advanced High strength steels for automotive industry: A review. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol.18, no.2, pp. 104 – 117.
- [3]. M. Janota, H. Neumann. (2007). “Share of Spot Welding and other Joining Methods in Automotive Production,” IIW-IIS, Document III-1423-07.

- [4]. R.S. Florea and K. N. Solanki. (2012). Resistance spot welding of 6061-T6 aluminum: Failure loads and deformation, *Materials & Design*, vol. 34, pp. 624–630.
- [5]. E.J. Gean, (1999). “Static and fatigue behavior of spot-welded 5182-0 aluminum alloy sheet,” *Welding Journal-New York*, vol.78, 80-86.
- [6]. D.R.G. Thornton. (1996). “Aluminum spot weld,” *Welding Journal-Including Welding Research Supplement*, vol. 75, no. 3, pp. 101–108.
- [7]. 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.
- [8]. S.S. Nayak, E. Biro, and 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*.
- [9]. 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.
- [10]. R. Sakano, et al. (2001). Development of spot FSW robot system for automobile body members, 3rd international symposium of friction stir welding.
- [11]. T. Iwashita. (2003). Method and apparatus for joining, US Patent 6601751 B.
- [12]. 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.
- [13]. 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.
- [14]. 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.
- [15]. 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.
- [16]. 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.
- [17]. 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.
- [18]. Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Walden, S., Murch, M. G., Temple, Smith, P., Dawes, C. J. (1995). United States Patent N° 5.460.317. Oficina de Patentes y Marcas de EE.UU.
- [19]. Z. Shen, X. Yang. (2013). Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints. *Materials and Design*, vol. 44, pp. 476 – 486.
- [20]. D.A. Wang, C.H Chen. (2009). Fatigue lives of friction stir spots welds in aluminum 6061-T6 sheets. *Journal of materials processing technology*, vol. 209, pp. 367-375.
- [21]. C. Shilling, J. dos Santos. (2002). Method and device for joining at least two adjoining work pieces by friction welding. US patent application 2002/0179682.
- [22]. S.J Prakash, S. Muthukumar. (2011). Refilling probe hole of friction spot joints by friction forming. *Materials and manufacturing processes*, vol. 26, pp. 1539–1545.
- [23]. S.L. Fox. (2010). Refill friction stir spot weld repair of a fatigue crack. Research experience for undergraduates. Rapid City (USA): South Dakota School of Mines and Technology.
- [24]. G. Balasubramaniam et al. (2021). Mechanical properties and failure mechanism of refill friction stir spot welds. *Journal of manufacturing and materials processing*, vol. 5, 118.

- [25]. The Welding Institute, TWI. (22 de octubre de 2023). “Refill friction stir spot welding”. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/refill-friction-stir-spot-welding-150>
- [26]. J.B. Jordon et al. (2010). Fatigue Evaluation of friction stir spot welds in magnesium sheets. Essential readings in magnesium technology. Ed. Springer. ISBN: 978-3-319-48099-2 (ebook), pp. 551 – 555.
- [27]. A. Mateos, M.J. Castillo, G. Lombera y M. Pelayo. (2022). Análisis de las velocidades de descenso y rotación en el desempeño de la soldadura por fricción agitación por puntos con proyección, Anales SAM CONAMET, pp. 55–56.
- [28]. A. Mateos, G. Lombardo, M.J Castillo y M. Pelayo. (2021). Puesta a punto de la técnica de soldadura por fricción agitación de puntos con proyección. 5to Congreso Argentino de la Ingeniería, CADI.