

Estudio de la microestructura-propiedades en la unión disímil aluminio-acero

Azalea Maldonado Pérez, Francisco Alvarado Hernández,
Enrique Alejandro López Baltazar, y Víctor Hugo Baltazar Hernández

Maestría en Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Unidad Académica de Ingeniería I,
Ramón López Velarde 801 centro, 98000 Zacatecas, Zac.

maldonado.azalea23@gmail.com

Resumen: Se presentan los resultados estructurales y su relación con la resistencia mecánica de una soldadura disímil mediante el proceso soldadura por fricción - agitación por puntos (Friction Stir Spot Welding FSSW) entre una aleación de aluminio (Al6063-T6) y un acero avanzado de alta resistencia (DP780), así como resultados de tratamiento térmico de acero H13. El parámetro variable fue la penetración del hombro de la herramienta en el aluminio, realizándose pruebas a 40, 60, 80 y 90 % de penetración. La microestructura se analizó por microscopía óptica y se midió la capacidad de carga con ensayos de tensión cortante. Los resultados indican que a mayores penetraciones de la herramienta se logra obtener mayores capacidades de carga.

Palabras clave: unión disímil, FSSW, capacidad de carga.

Abstract: Microstructural results and its relationship with mechanic resistance of a welded joint made by Friction Stir Spot Welding between an aluminum alloy (Al6063-T6) and an advanced high strength Steel (DP780) are presented, as well as H13 steel heat treatment results. The varied parameter was the penetration of shoulder in the aluminum sheet, performing tests at 40, 80 and 90 % of penetration, while the other process parameters were left constant. The microstructure was analyzed by optical microscopy and the load capacity was measured with shear tension tests. The results indicate that at higher penetration of the tool it is achieved a higher load capacity.

Keywords: dissimilar welding, FSSW, load.

1. Introducción

Problemas ambientales tales como las emisiones de gases de efecto invernadero son derivados de la quema excesiva de combustibles fósiles para la generación de energía. En el sector automotriz un intento para mitigar este problema busca una reducción en los pesos de las estructuras de los autos para así aumentar la eficiencia de los combustibles [1].

En orden para aligerar los pesos de los autos se han sustituido algunas partes de las estructuras de carrocería por aceros avanzados de alta resistencia (AHSS por sus siglas en inglés) que son aceros con altas propiedades mecánicas como resistencia, resistencia a la fatiga, ductilidad y tenacidad lo cual les permite absorber mayores energías de impacto que aceros convencionales y así mismo proteger la integridad de los pasajeros; aunado a la mejora en las propiedades mecánicas hay una reducción en peso debido a la fabricación láminas de menor espesor con buenas propiedades mecánicas [2]. Sin embargo, en años recientes se ha incluido en partes específicas de los autos materiales no ferrosos [2] con densidades menores a los aceros, pero con propiedades mecánicas similares como lo son las aleaciones de aluminio o magnesio.

Al tratarse de materiales disímiles resulta compleja la unión de estos por métodos convencionales como lo es la soldadura por

resistencia por puntos (RSW) ampliamente usada en el sector automotriz, además que en materiales con bajo punto de fusión es común que se presenten defectos como una alta porosidad y formación de compuestos intermetálicos frágiles [3], es por eso que en el 2003 Mazda desarrolló la soldadura por fricción - agitación por puntos (FSSW) que es un proceso en estado sólido derivado de la soldadura por fricción y agitación (FSW) [4]. El principio básico de estos es el movimiento rotacional de una herramienta sobre las láminas o placas a unir, generándose altas temperaturas, pero sin llegar al punto de fusión de los materiales y un alto grado de deformación plástica. La diferencia entre FSW y FSSW es que en FSSW el movimiento es meramente rotacional, generando únicamente un punto de soldadura y no un “cordón”. En la Figura 1 se observa un esquema del proceso FSSW.

La herramienta giratoria está constituida por dos cuerpos concéntricos llamados hombro y pin. Aunque la herramienta no es un parámetro de operación, tiene una gran influencia en la calidad de la soldadura, esta herramienta puede ser fabricada con diferentes materiales siempre y cuando sea un material resistente a temperatura ambiente y a la temperatura a la que se lleva a cabo el proceso, resistente a la fatiga, tenaz a la fractura, resistente al desgaste, estabilidad térmica y química; además debe ser un material accesible [4].

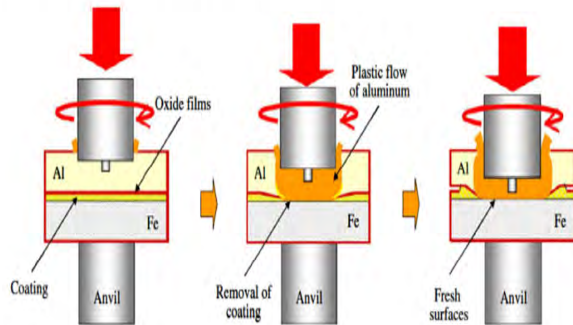


Fig. 1. Proceso FSSW [2].

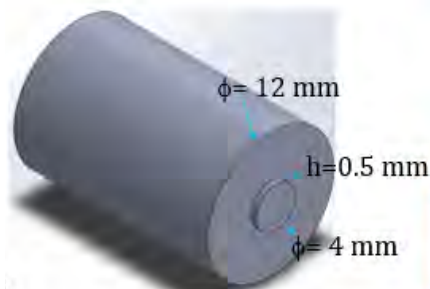


Fig. 2. Diseño de la herramienta.

De acuerdo a los requerimientos se intuye que el material de la herramienta depende de los materiales que se pretenden soldar. Uno de los materiales más utilizados para soldar aluminio es el acero H13 [5], aunque es posible soldar materiales con mayores resistencias y temperaturas de fusión como acero con algunas precauciones. Además del material, los aspectos geométricos de la herramienta también son importantes como diámetro y perfiles del hombro y pin y la longitud del pin.

Los parámetros operacionales en el proceso FSSW son rpm, velocidad de penetración, penetración y tiempo de permanencia.

Aunque en un principio la soldadura por fricción fue diseñada para la unión de aleaciones de aluminio [4], estos procesos tienen un futuro prometedor en la soldadura de materiales disimiles, incluyendo aluminios, aceros y aleaciones de magnesio, ya que se reducen los problemas antes mencionados.

En años recientes la investigación de soldadura FSSW ha tomado relevancia, en especial para su aplicación en aceros con aleaciones de aluminio para la industria automotriz [6].

Actualmente hay una tendencia en el uso de aceros con un recubrimiento de zinc. Elrefaey et. al. [7], en sus estudios encuentra que el zinc actúa como lubricante en el proceso FSSW al difundirse con el aluminio, suprimiendo su punto de fusión y logrando obtenerse mayores áreas de unión.

Lathabai et. al. [8], en sus estudios encuentra que la penetración de la herramienta tiene una influencia alta en las propiedades mecánicas en una soldadura de aluminio 6060 y a su vez existe una relación directa con el área de unión.

Piccini et. al. [2], concluye de sus estudios que una herramienta con menor longitud de pin produce uniones entre aluminio y acero

con mejores propiedades mecánicas, ya que se incrementa la agitación del aluminio en el acero por un mayor efecto termo-mecánico de la herramienta en la superficie.

Una problemática que se presenta para ampliar la aplicación de este proceso de soldadura en uniones disimiles de aceros es que la información reportada es escasa, en este tipo de soldadura hay varios parámetros que tienen una gran influencia en el desempeño mecánico de la soldadura, por lo que sigue resultando interesante explorar el proceso.

En este trabajo de investigación, se realizó una unión por el proceso de FSSW de una lámina de aluminio (Al-6063T6, 3.175 mm) y una lámina de acero avanzado de alta resistencia con una capa de zinc (DP-780, 1.240 mm) con una herramienta fabricada a base de acero H13 tratado.

Se analizó el cambio en la microdureza del acero H13 al tratarse térmicamente en base a su microestructura, así como la relación estructura – capacidad de carga de las uniones.

2. Materiales y método

2.1 Materiales

Los materiales utilizados para las pruebas fueron una lámina de aluminio 6063-T6 de 25.4 mm de ancho y 3.175 mm de espesor, así como una lámina de acero galvanizada DP780 de 25.4 mm de ancho y 1.240 mm de espesor.

2.2 Diseño y preparación de la herramienta

La herramienta que se usó para las soldaduras se fabricó a partir de una barra de acero AISI/SAE-H13 de 12.7 mm de diámetro, con una dureza inicial promedio de 13.5 HRC. Se eligió un perfil de pin cilíndrico con las siguientes dimensiones: 12 mm de diámetro de hombro, 4 mm de diámetro de pin y 0.5 mm de longitud de pin, el diseño se realizó en el software SolidWorks™, en la Figura 2 se observa una imagen del diseño de la herramienta con sus dimensiones.

Después del primer paso que fue completar el diseño de la herramienta; se procedió a realizar un primer maquinado (burdo) con la finalidad de obtener la geometría diseñada, esto se realizó en un torno CNC marca TITANIUM™ con la finalidad de tener mejor precisión.

Posterior al maquinado burdo, se realizaron los tratamientos térmicos de templado y revenido en un horno tipo mufla marca Felissa™ para aumentar la dureza y la tenacidad previo al proceso de soldadura. En la Figura 3 se muestran las rutas de tiempo y temperatura de los tratamientos térmicos mencionados. Con un durómetro marca Affri™ se corroboró que se había alcanzado la dureza promedio de 49 HRC, coincidiendo con lo reportado en la literatura. La microestructura obtenida se observa en la Figura 4.

Finalmente se realizó un segundo maquinado (fino) en el torno para retirar la capa de óxido formada durante los tratamientos térmicos y obtener un diámetro de hombro de 12 mm, en la Figura 5 se presenta una imagen de la herramienta después de realizarse el maquinado fino.

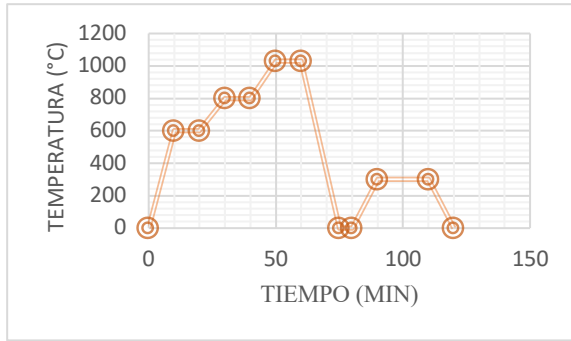


Fig. 3. Rutas de tiempo y temperatura de temple y revenido.

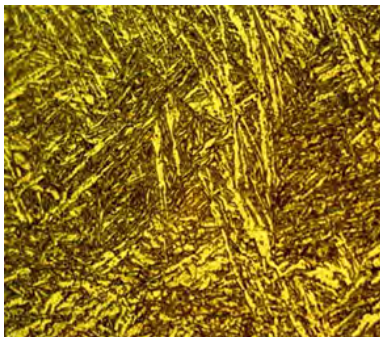


Fig. 4. Microestructura del acero H13 después de tratamiento térmico.



Fig. 5. Herramienta después de maquinado fino.



Fig. 6. Sistema de sujeción fabricado.

Tabla 1. Parámetros de operación

Parámetro	Valor
rpm	2836
Velocidad de penetración (mm/min)	15
Tiempo de permanencia (s)	5
Penetración (% de penetración en lámina de aluminio)	40, 60, 80, 90

Las soldaduras se realizaron en una fresadora vertical CNC marca GSK. En la Tabla 1 se presentan los parámetros de operación.

2.4 Análisis metalográfico

Primeramente, para cada condición de prueba de soldadura se segmentaron con la electroerosionadora, las dos pruebas destinadas para su análisis metalográfico en sentidos transversal y longitudinal.

Estas pruebas fueron segmentadas en el área de soldadura obteniéndose segmentos de 25.4 mm de longitud y 12.7 mm de ancho con el fin de poder observar las zonas importantes en la soldadura por fricción.

Enseguida, los cortes obtenidos tuvieron un proceso de preparación previo a su análisis metalográfico con el fin de eliminar defectos superficiales derivados del corte, el cual consistió en encapsulado en frío con resina epóxica, desbaste con diferentes números de lijas y pulido preliminar y final con alúmina y sílica coloidal obteniéndose acabado espejo.

Después de que las muestras consiguieron acabado especular fue necesario realizar un ataque químico con el que se revelaron aspectos microestructurales de las soldaduras. Este ataque químico se realizó con una solución acuosa de ácido fluorhídrico por inmersión y frotación durante un tiempo aproximado de 2 minutos, después las muestras se lavaron y secaron minuciosamente para su análisis.

2.3 Proceso de soldadura por fricción-agitación por puntos

El primer paso fue seccionar las láminas en segmentos de 100 mm de largo por medio de una electroerosionadora marca Suzhou.

Enseguida, con la finalidad de evitar que con la vibración y el torque derivados del proceso las láminas se movieran y que las soldaduras tuvieran un mejor acabado, se diseñó y fabricó un sistema de sujeción con una placa de acero, Figura 6. Se estipuló que la longitud de traslape de las láminas fuera de 50.8 mm.

Por cada condición de parámetros se realizaron seis pruebas, donde cuatro de ellas se usaron como probetas para su ensayo a tensión y dos se segmentaron para su análisis metalográfico.

Finalmente las muestras se analizaron por microscopía óptica con un microscopio metalográfico marca Unión Versamet, obteniéndose micrografías a diferentes aumentos.

2.5 Ensayos a tensión cortante

Una vez que se obtuvieron las probetas designadas para la evaluación de capacidad de carga, se realizaron ensayos de tensión cortante a una velocidad de 3 mm/min. en una máquina universal de marca Shimadzu™, en la figura 7 se muestra una imagen de una probeta ensayándose.

Los datos se procesaron en el software Trapezium™, las probetas después de ensayarse se muestran en la Figura 8.

3. Resultados

En la Tabla 2 se reportan el ancho y la penetración promedio del hombro en el aluminio medidos para cada una de las condiciones, estas dimensiones se midieron en el software Image-Pro Plus™.

En las figuras 9-12 se muestran los resultados macro y micro estructurales de las soldaduras, donde se señalan las tres zonas más importantes para la soldadura por fricción: la zona afectada termo-mecánicamente (a), la zona de agitación (b) y la zona afectada por el calor (c), las micrografías están capturadas a 100 X.

De acuerdo al análisis de las figuras 9-12 se observa un mismo comportamiento en la microestructura de las soldaduras independientemente de la penetración.

En la **zona de agitación** debido a la alta deformación plástica y calor generado durante el proceso, se observa una microestructura de granos finos y equiaxiales, esto posiblemente es resultado de una recristalización dinámica [4, 5].

En la **zona afectada termo-mecánicamente** el material experimenta incremento de temperaturas y deformación por lo que se caracteriza por una microestructura altamente deformada, se observan algunos precipitados [5].

Los granos en la **zona afectada por el calor** tienen una geometría alargada y es evidente el crecimiento de grano, también debido a que las temperaturas alcanzadas exceden la temperatura solvus de algunos precipitados se observa una mayor área de precipitados que se identifican en color oscuro [4, 5].

El acero no presenta deformación, esto se debe a que en base a la longitud del pin y las penetraciones establecidas, la herramienta nunca toca el acero. Esto es un aspecto importante ya que al estar fabricado a base de acero H13 podría sufrir de un severo desgaste en caso de tocarlo.

La interfase se observa de un color brillante y no es homogénea en todas las zonas, se presenta principalmente hacia el centro del punto en sentido transversal.

En la Figura 13 se muestra un gráfico de las capacidades de carga promedio obtenidas en función de su penetración.



Fig. 7. Ensayo de tensión cortante.

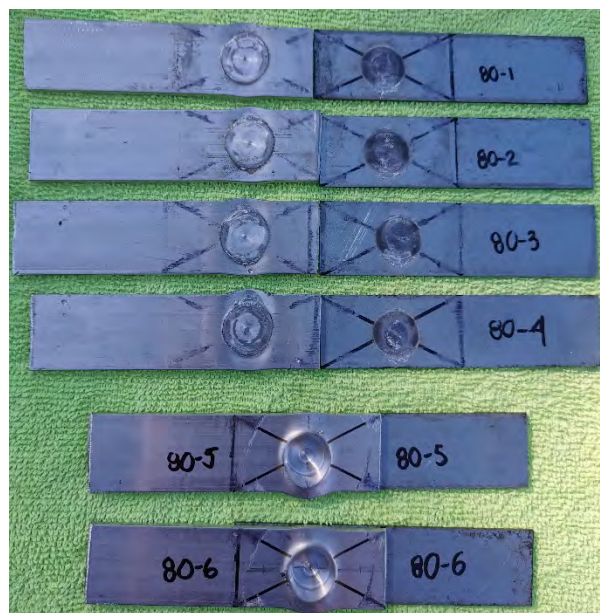


Fig. 8. Probetas después de ensayo de tensión.

Tabla 2. Dimensiones promedio de las soldaduras

Condición	Ancho (mm)	Penetración del hombro (mm)
40 %	11.85	1.0
60 %	10.90	1.95
80 %	11.7	2.45
90 %	11.95	3

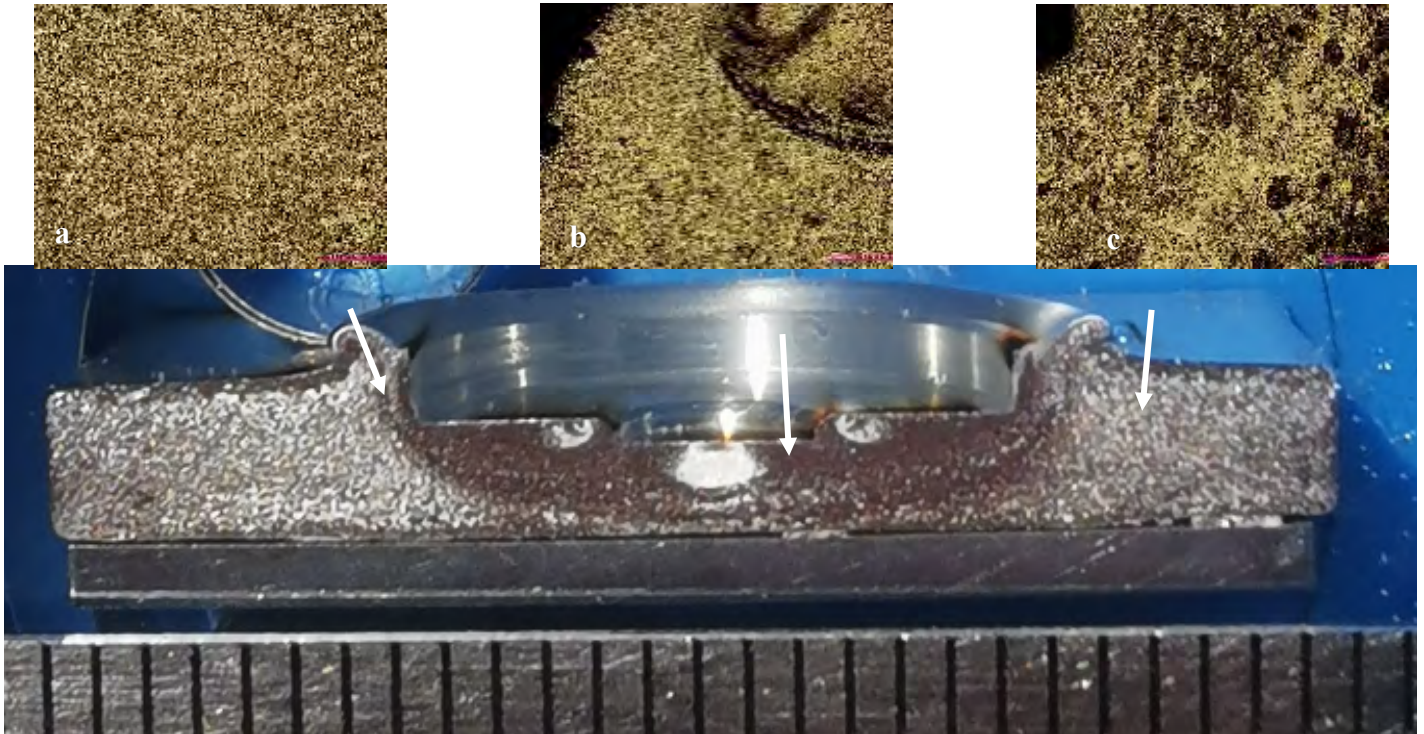


Fig. 9. Macrografía de la prueba a 40 % de penetración a) zona afectada termo-mecánicamente, b) zona de agitación y c) zona afectada por el calor.



Fig. 10. Macrografía de la prueba a 60 % de penetración a) zona afectada termo-mecánicamente, b) zona de agitación y c) zona afectada por el calor.

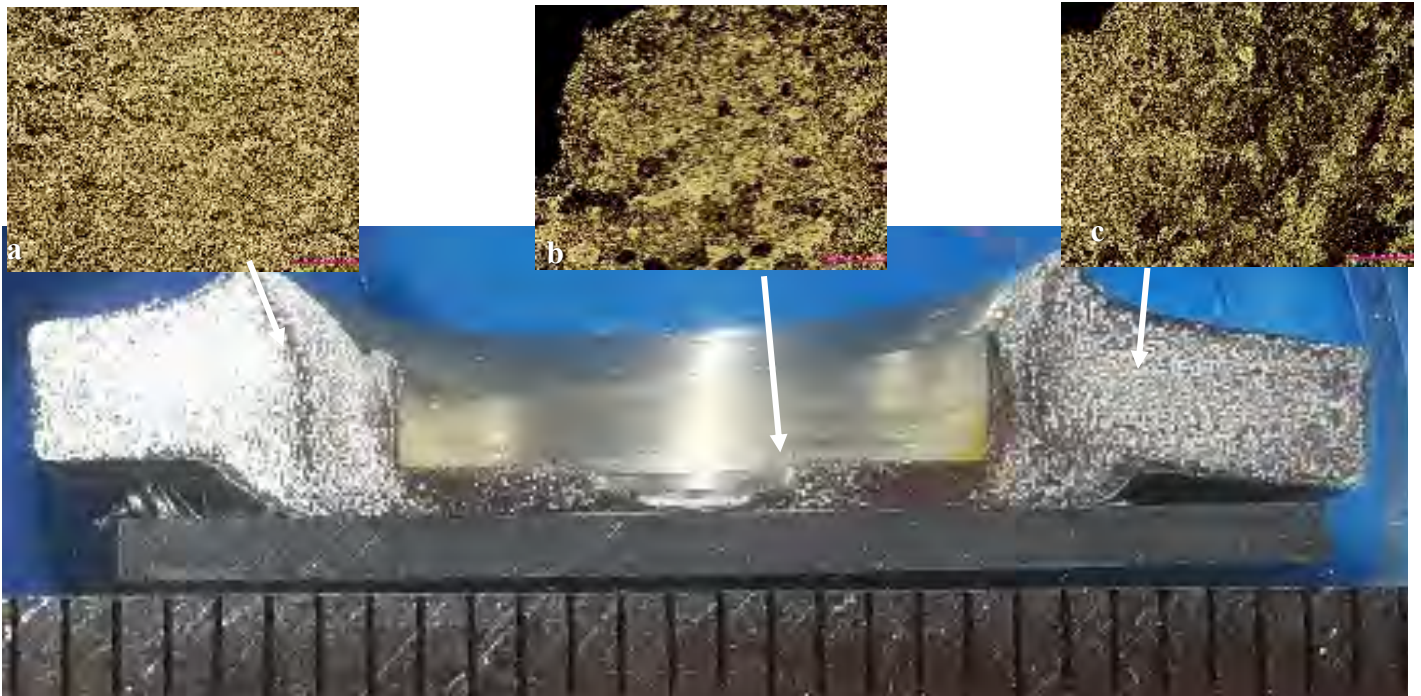


Fig. 11. Macrografía de la prueba a 80 % de penetración a) zona afectada termo-mecánicamente, b) zona de agitación y c) zona afectada por el calor.



Fig. 12. Macrografía de la prueba a 90 % de penetración a) zona afectada termo-mecánicamente, b) zona de agitación y c) zona afectada por el calor.

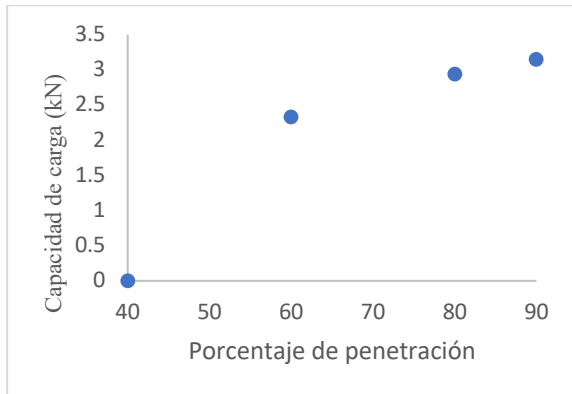


Fig. 13. Gráfico de capacidad de carga en función del porcentaje de penetración.

Las capacidades de carga promedio para las penetraciones de 40, 60, 80 y 90 % son 0, 2.34, 2.94 y 3.15 kN respectivamente. En las pruebas realizadas a 40 % de penetración no se observó una unión, posiblemente se deba a que la herramienta no alcanza suficiente penetración en las láminas y no hay una deformación idónea que permita desarrollar la unión. Por otro lado, es clara la tendencia ascendente de la capacidad de carga respecto a la penetración, si hay una mayor penetración hay una mayor fuerza aplicada y mayor deformación.

4. Conclusiones

1. Se estableció una ruta correcta de tratamientos térmicos ya que se alcanzó una dureza óptima para el uso de una herramienta fabricada a base de acero H13 en el proceso de FSSW.

2. En su análisis microestructural se encontró una alta deformación en la zona de agitación con granos refinados y equiaxiales, en la zona afectada termo-mecánicamente se observa una gran deformación en la microestructura y en la zona afectada por el calor se encontraron granos alargados y visiblemente más grandes, además de una mayor cantidad de precipitados.

3. Los ensayos realizados a 40 % de penetración no lograron unirse. La menor capacidad de carga promedio alcanzada fue de 2.34 para 60 % de penetración y la de máxima capacidad fue de 3.15 kN para la penetración de 90 %.

5. Agradecimientos

El proyecto de investigación se realizó con la infraestructura y equipo de la Universidad Autónoma de Zacatecas, se agradece a los técnicos y encargados de los laboratorios donde se desarrolló el proyecto. También se agradece al CONACYT por la beca otorgada para realizar este proyecto.

Referencias

- [1] Kimapong K., Watanabe T., Friction stir welding of aluminum alloy to steel, *Welding journal*, 277S-282S, 2004.
- [2] Piccini J., Svoboda H., Effect of pin length on Friction Stir Spot Welding (FSSW) of dissimilar Aluminum-Steel joints, *Procedia Materials Science*, Vol.9, 504-513, 2015.
- [3] Chen K., Liu X., Ni J., Effects of Process Parameters on Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloy to Advanced High-Strength Steel, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(8), 2017.
- [4] Shen Z., Ding Y., Gerlich A., Advances in Friction stir spot welding, *Critical Reviews in Solid State and Material Sciences*, 457-534, 2019
- [5] Mishra R.S., Ma Z.Y., *Friction Stir Welding and processing*, Springer Cham, 2014, pp.99.
- [6] Bozzi S., Helbert A.L., Baudin T., et.al., *Mechanical Behaviour and Microstructure of Aluminum-Steel Sheets Joined by FSSW, Texture, Stress, and Microstructure*, Vol. 2008, 8 pages, 2008.
- [7] Elrefaey A., Takahashi M., Ikeuchi, K., Friction-Stir-Welded Lap Joint of Aluminum to Zinc-Coated Steel, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, Vol. 23 186-193, 2005.
- [8] Lathabai S., Painter M., et al, Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy, *Scripta Materialia - SCRIPTA MATER*, Vol. 55, 899-902, 2006.