



## “PUESTA A PUNTO DE LA TÉCNICA DE SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN DE PUNTOS CON PROYECCIÓN”

Mateos, Alejandro Andrés<sup>a</sup>; Lombardo, Gianluca<sup>a</sup>; Castillo, María José<sup>a,b</sup>; Lombera, Guillermo<sup>c</sup>; Pelayo, Marcelo<sup>d</sup>

- a. Laboratorio de Ensayos de Materiales y Estructuras - LEMEJ, UNNOBA, Junín, Buenos Aires, Argentina.
  - b. Desarrollo y Tecnología de los Materiales - DEYTEMA, UTN FRSN, San Nicolás, Buenos Aires, Argentina.
  - c. Facultad de Ingeniería, UNMdP – CONICET, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.
  - d. Facultad de Ingeniería, UNLZ, Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina.
- amateos@unnoba.edu.ar

### **Resumen**

El proceso de soldadura dominante en la industria automotriz es el de resistencia por puntos. Una alternativa a este es soldadura por fricción agitación de puntos con proyección (PFSSW) que genera puntos de soldadura en fase sólida haciendo girar una herramienta sin pin y colocando una proyección en la cara opuesta a la de la incidencia de ésta. El objetivo de este trabajo es determinar las variables de incidencia principales en la puesta a punto de la técnica de PFSSW. Para ello se llevaron adelante soldaduras de chapas de acero al carbono comerciales de 0,9 mm y 1,25 mm de espesor nominal. Las mismas fueron caracterizadas metalográficamente a través de microscopía óptica y mecánicamente mediante la realización de ensayos de dureza Vickers HV1 y ensayos de tracción. Las soldaduras se realizaron con dos herramientas (12 mm y 16 mm) y una proyección de 5 mm de diámetro y 0,3 mm de altura. La velocidad de giro fue de 2500 RPM y la velocidad de descenso varió entre 0,5 y 2 mm/min. Se ensayaron las uniones a corte por tracción según la norma AWS D8.1M:2013 y se realizaron ensayos de dureza HV0,3 en distintas zonas de interés. Adicionalmente, se tomaron macro y micrografías de los puntos de soldadura. Se encontró que las chapas se unieron efectivamente todas las soldadura realizadas superaron los requisitos impuestos por la norma. Asimismo, la relación entre los diámetros de la herramienta y proyección y, la velocidad de descenso son parámetros importantes en el desempeño del proceso.

### **Abstract**

The main process in the automotive industry is Resistance Spot Welding. An alternative to this is Projection Friction Stir Spot Welding (PFSSW) that produce spots of welds in solid state spinning a plain tool, without pin, and compressing sheets against a projection in the back anvil. The aim of this paper is determinate incidence variables in the set-up of the PFSSW. For this, weldings on commercial carbon steel sheets with thickness of 0,9 mm y 1,25 mm was carried out. The samples was metallographically characterized with optical microscopy and mechanically analyzed through Vickers Hardness HV1 and tension test. The welds were made using plain tools of 12 mm and 16 mm and a projection with 5 mm diameter and 0,2 mm height. The rotational speed was 2000 RPM and the descent speed was 2 mm/min. On samples with spots welds shear tension test according AWS D8.1M:2013 and Vickers microhardness profile HV0,1 were performed. Furthermore, macro and microphotography were taken on welds. Effective welds were obtained and all of them exceeded the standard's requirements. In addition, relationship between diameters of tool and pin and descent speed are important variables.

**Palabras clave:** Soldadura por fricción agitación de puntos, Proyección, Chapas de aceros, Industria Automotriz.

## INTRODUCCIÓN

Día a día la producción de la industria automotriz va en constante aumento. En pos de ofrecer vehículos más seguros y a la vez más livianos propicia el uso de distinto tipo de materiales para el armado de las carrocerías. Adicionalmente, se busca la obtención de unidades que requieran procesos de fabricación cada vez más amigables con el medioambiente. En este contexto, el proceso de unión de materiales es un aspecto importante a analizar debido a la gran cantidad de soldaduras que los automóviles tienen. Es por esto, que se está en la constante búsqueda de procesos que consuman menor cantidad de energía generando a su vez menores emisiones de CO<sub>2</sub>.

El proceso dominante en la unión de chapas para el conformado de las carrocerías de automóviles es el proceso de soldadura de resistencia por puntos (RSW, por su sigla en inglés: Resistance Spot Welding). Entre sus principales ventajas se encuentra que es un proceso simple y rápido que genera una alta cantidad de puntos de soldadura por unidad de tiempo. Por otro lado, entre sus principales desventajas, se puede encontrar que consume una alta cantidad de energía para efectivizar la unión, al mismo tiempo que, no se desempeña satisfactoriamente en algunas aleaciones, como por ejemplo en las de base Aluminio o Magnesio.

Otra limitante del proceso RSW, se basa en que en ciertas zonas de la "pepita de soldadura" se alcanzan temperatura de fusión lo que genera que parte de la unión soldada, en algún momento, se encuentre en estado líquido y solidifique rápidamente. Este rápido cambio de estado del material puede propiciar la aparición de ciertos defectos asociados a la solidificación, como la aparición de fisuras producto de la retracción generada.

Alternativamente a este proceso de soldadura, desde hace alrededor de dos décadas, se han desarrollado otros procesos que intentan mitigar los problemas que pueden aparecer con el RSW. En este sentido, en el año 2003 se desarrolló un proceso denominado Friction Stir Spot Welding (FSSW) que es una variante al proceso Friction Stir Welding (FSW), desarrollado en el año 1991 por la empresa The Welding Institut (TWI).

El FSSW utiliza una herramienta que gira en contacto con dos láminas de acero superpuestas, generando calor y agitando el material para producir la unión. La herramienta es el componente principal del proceso y consta de dos partes; el hombro que es el encargado de entrar en contacto con la chapa superior y propiciar la generación del calor y, el pin que se introduce entre las dos chapas y genera un flujo de material plastificado.

Este proceso presenta un gran potencial frente a los nuevos desafíos de la industria automotriz debido a que es un proceso en fase sólida, por lo que en ninguna zona de la soldadura se alcanzan temperaturas de fusión. Esto evita los defectos descriptos anteriormente. Por el contrario, entre sus limitaciones se encuentra la presencia del hueco que provoca la herramienta al retirarse de la zona de unión. Este fenómeno disminuye el área de unión y genera un efecto visual adverso en la terminación superficial de los puntos de soldadura.

Frente a lo anteriormente mencionado, se han desarrollado varios procesos (o variantes del FSSW) que intentan evitar la presencia del keyhole (hueco provocado por la herramienta). Uno de estos, es el Proyección Friction Stir Spot Welding (PFSSW) que utiliza una herramienta plana que incide sobre dos chapas superpuestas y que presenta una proyección o protuberancia de bajo espesor que tiene por objetivo alterar el flujo de material plastificado generando así una unión efectiva. Cabe aclarar, que es una de las técnicas actualmente en estudio y de las cuales se han encontrado publicaciones por parte de algunos investigadores de origen indio.

En el presente trabajo se analiza la puesta a punto de la técnica de soldadura PFSSW con el objetivo de determinar las variables de mayor incidencia en el proceso. Este trabajo se enmarca en el desarrollo experimental de un doctorado donde se aplicará esta técnica para confeccionar unión por puntos sobre chapas de acero Dual Phase. Con el estudio desarrollado en el marco del posgrado se espera poner a disposición una técnica de soldadura por puntos en estado sólido alternativa a la tradicionalmente utilizada en el sector automotriz.

## DESARROLLO

### Materiales y Métodos

El Material Base (MB) utilizado en este trabajo se trata de chapas de acero al carbono laminadas en caliente de calidad comercial calibre 18 y 20, es decir, de espesores de 1,25 mm y 0,9 mm, respectivamente. Las chapas fueron seccionadas de 140 mm de largo y 45 mm de ancho según se indica en la norma AWS D8.1M:2013 "Specification for Automotive Weld Quality - Resistance Spot Welding of Steel".

Para la ejecución de las soldaduras se utilizó una fresadora CNC universal de 3 ejes modelo Mecatronic con una potencia de husillo de 3 HP. Los comandos del equipo se programaron en código g los cuales se mantuvieron constantes a lo largo del desarrollo experimental.

Adicionalmente, se dispuso de una celda carga de 25 kN con indicador EL-05B vinculado a la mesa de trabajo con el objetivo de registrar la carga la carga axial aplicada por el husillo obtenida durante la soldadura. En la figura 1 puede observarse la disposición de la soldadura.

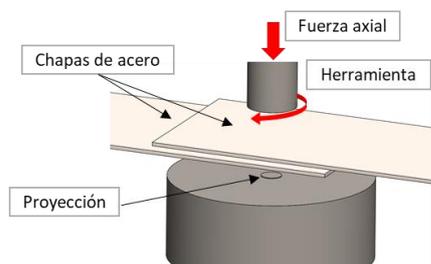


Figura 1. Esquema de la soldadura

Al momento de realizar las soldaduras, las chapas se limpiaron con solvente a fin de eliminar la grasitud presente y se dispusieron sobre el dispositivo de sujeción vinculadas con tornillos para asegurar su firmeza y evitar el desplazamiento de ellas durante la soldadura.

A partir de experiencias previas y en función del rastreo bibliográfico realizado, se determinaron los parámetros utilizados durante toda la experiencia. En este sentido, los mismos fueron una invariante durante la ejecución de las soldaduras dejando como variable dependiente la carga axial alcanzada. En la tabla 1 se muestran los parámetros utilizados.

Tabla 1. Parámetros utilizados

Parámetros	
Velocidad de giro	2000 RPM
Velocidad de descenso	2 mm/min
Tiempo de mantención	3 s
Longitud de solape	45 mm
Diámetro herramienta	12 mm y 16 mm
Diámetro proyección	5 mm
Altura proyección	0,2 mm

En primera instancia se obtuvo la composición química del MB determinando los elementos de aleación básicos sobre la chapa de 0,9 mm de espesor. En la tabla 2 se muestran los porcentajes en peso obtenidos.

Tabla 2. Composición química chapa 0,9 mm

C	Mn	Si	P	S
0,06	0,25	<0,01	0,016	0,013
Cr	Ni	Mo	Fe	Ceq
0,02	0,02	<0,01	Bal.	0,107

Además, se realizó la caracterización metalográfica a través de microscopía óptica y la evaluación mecánica a través de ensayos de tracción y dureza Vickers.

Para cumplir con lo anterior, en primer lugar, se seccionaron y embutieron las muestras. Las mismas fueron desbastadas utilizando papeles de lija 60, 120, 220, 320, 400 y 600 y pulidas con pasta diamantada de 6  $\mu$ m y 1  $\mu$ m. El revelado de la estructura se realizó con Nital 2 % (2 % de ácido nítrico en alcohol etílico).

Posteriormente, se obtuvieron micrografías a 500 aumentos con un microscopio óptico marca Digimes modelo XJL-20.

Por otro lado, los ensayos de tracción se realizaron con una máquina universal de ensayos de 600 kN de capacidad, utilizando en este caso, el tercer campo de ensayo que posee una celda de carga de 50 kN. Sobre las muestras, de sección rectangular, se midió la resistencia al límite proporcional (Rp), la carga máxima (Rm) y la elongación (A%).

Por otra parte, se realizó el ensayo de microdureza Vickers con 100 gf (HV<sub>0,1</sub>) de carga para determinar la dureza promedio del MB.

Una vez ejecutadas las soldaduras, se realizaron ensayos de corte por tracción según lo indicado por la norma AWS D8.1M:2013 con una

velocidad de 1 mm/min de alejamiento de las mordazas, determinando la carga máxima alcanzada y la deformación obtenida al alcanzar ésta.

Sobre las juntas soldadas se tomaron macrográficas de las superficies de incidencia de la herramienta y de la proyección y se realizó un corte transversal coincidente con el eje de la herramienta.

Se realizó, además, un perfil de microdureza a lo largo del espesor del punto de soldadura, en la zona central del mismo, con el objetivo de detectar zonas de ablandamiento.

### Resultados y discusión

En función del análisis realizado se determinó que el acero presenta una matriz ferrítica con islas de perlita (Figura 2).

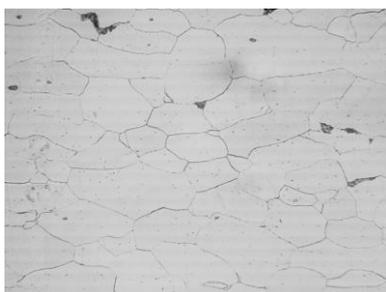


Figura 2: Micrografía del MB (chapa 0,9 mm)

En la tabla 2 se presentan resumidos los resultados de la caracterización mecánica.

Tabla 2. Propiedades mecánicas MB

Espesor	Rp [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
0,9 mm	157	303	45,2
1,25 mm	179	321	45,1

En referencia a la ejecución de las soldaduras, la carga axial promedio alcanzada para las chapas con la herramienta de 12 mm fue de 4198 N para las chapas de 0,9 mm de espesor y 4269 N para las de 1,25 mm. Por otro lado, para la herramienta de 16 mm las cargas axiales resultaron 4418 N para las chapas de 0,9 mm y 4455 N para las de 1,25 mm.

En la figura 3 se pueden observar las superficies de las chapas soldadas; a) herramienta, b) pin.

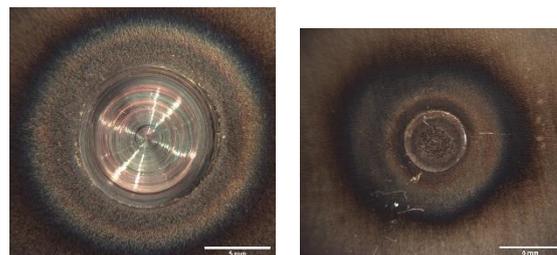


Figura 3. zonas incidencia de a) herramienta, b) pin

En las superficies de las chapas soldadas se observa una generación simétrica del calor propia de la simetría del proceso, al mismo tiempo que la zona afectada térmicamente tiene un diámetro mayor en la superficie de incidencia de la herramienta producto del diámetro de ésta. Adicionalmente, no se observó agrietamiento superficial en ninguna de las caras.

En función de la resistencia máxima de los MB utilizados, se calculó la resistencia mínima de los puntos de soldadura según lo indicado en la norma AWS mencionada. Esto resultó en que, para las chapas de 0,9 mm, la mínima carga de rotura a alcanzar debe ser de 1879 N, mientras que para las de 1,25 mm debe ser de 1996 N.

En relación al ensayo de corte por tracción, en la tabla 3 se encuentran los valores alcanzados.

Tabla 3. Cargas y deformaciones en los ensayos corte por tracción

Espesor / Diámetro herramienta	Carga [N]	Def [mm]
0,9 / D12	4048	1,207
0,9 / D16	4379	2,006
1,25 / D12	4001	1,109
1,25 / D16	3815	1,163

Los resultados de los ensayos de corte por tracción mostraron que todas las probetas superaron las cargas de rotura mínima establecida y que la totalidad de ellas rompieron por el modo interfacial provocándose la rotura en la interfaz de ambas chapas.

A partir de los resultados, puede observarse que, para un mismo diámetro de herramienta, las juntas realizadas con chapas de mayor espesor presentan una leve resistencia menor. Asimismo, para un mismo espesor, el comportamiento se invierte entre las chapas de 0,9 y 1,25 mm. En este sentido, en las primeras, al aumentar el

diámetro de la herramienta la resistencia aumenta, mientras que en las segundas disminuye.

Esto último podría deberse a que, al existir un espesor mayor, la relación entre los diámetros del pin y la herramienta se vuelven un factor relevante para el desempeño de la junta, por lo que, para grandes diferencias entre ellos, la zona soldada se ve disminuida. Este efecto, pudo observarse también en experiencias previas realizadas.

En cuanto al perfil de microdureza  $HV_{0,1}$  que se realizó, se observa que la dureza de la unión (150  $HV_{0,1}$  promedio) es superior a la del MB (113  $HV_{0,1}$  promedio), así como también un cambio brusco de la misma cerca de la interfaz entre ambas chapas, que es la zona donde se produce la rotura en los ensayos de corte por tracción.

Del análisis metalográfico surge que las juntas presentan una zona de unión donde la interfaz entre las chapas desaparece extendiéndose por todo el ancho de la proyección (5 mm aproximadamente) (Figura 4). Se puede observar también que la indentación provocada por el método es de 10,7 %, considerando el hincado producido al soldar respecto al espesor combinado de ambas chapas.



**Figura 4. Macrografía de una junta soldada (chapas de 0,9 mm)**

En la macrografía se puede observar una zona térmicamente afectada (ZTA) que se extiende desde el borde de la herramienta hasta el borde de la proyección y una zona agitada (ZA) en el interior de los límites de ésta.

## CONCLUSIONES

En función de lo realizado en este trabajo y a partir de experiencias previas, se seleccionaron parámetros adecuados que permitieron la realización de puntos de soldadura con el proceso PFSSW.

Los parámetros seleccionados propiciaron la realización de juntas sanas logrando eliminar prácticamente la interfaz de las chapas en la zona

central de la unión. Adicionalmente, los ensayos de corte por tracción mostraron que las juntas superan los requisitos establecidos por la norma AWS D8.1M:2013 para el MB soldado.

Para un mismo diámetro de herramienta, y manteniendo la profundidad de descenso constante, se encontró que las chapas finas (0,9 mm) presentan un mejor desempeño. Por otro lado, observando la variación de diámetros de herramienta (relación entre diámetro de la herramienta y diámetro de la proyección) las chapas de 0,9 mm presentaron una carga de rotura superior para la de 16 mm, mientras que las chapas de 1,25 mm mostraron una menor carga. Este fenómeno podría deberse a que sobre las chapas gruesas la diferencia de diámetros entre pin y herramienta cobra una importante relevancia para el desempeño de la junta disminuyendo el área efectivamente unida.

## AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Ensayos de Materiales y Estructuras - LEMEJ por el apoyo económico para la realización del trabajo experimental.

## REFERENCIAS