

# Influencia de variables en el proceso Projection Friction Stir Spot Welding en chapas de acero al carbono.

## Influence of variables in Projection Friction Stir Spot Welding process on carbon steel sheets.

Presentación: 08/10/2023

### **Elias Acosta**

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

### **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](mailto:glombardo@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.  
[Maríajose.castillo@nexo.unnoba.edu.ar](mailto:Maríajose.castillo@nexo.unnoba.edu.ar)

### **Alejandro Mateos**

Laboratorio de Ensayos de Materiales y Estructuras (LEMEJ) – Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires – CIC, Junín, Argentina  
[aamateos@unnoba.edu.ar](mailto:aamateos@unnoba.edu.ar)

### **Resumen**

En el presente trabajo se analiza el desempeño de soldaduras realizadas sobre chapas de acero al carbono mediante el proceso de soldadura “Projection Friction Stir Spot Welding (PFSSW)” utilizando diferentes combinaciones de parámetros. Entre los intervinientes se encuentran: por parte de la herramienta; velocidad de giro y de descenso, profundidad de descenso y diámetro, mientras que, por parte de la proyección fueron variantes la altura y el diámetro. A fin de evidenciar los efectos de la variación de parámetros, se realizó una evaluación metalográfica, ensayos mecánicos de Shear Tensile Test (STT) y de microdureza Vickers.

**Palabras clave:** Projection Friction Stir Spot Welding, Chapas de acero, Parámetros de soldadura

### **Abstract**

In this work, the performance of welds carried out on carbon steel sheets using the “Projection Friction Stir Spot Welding (PFSSW)” welding process using different combinations of parameters is analyzed. Among those involved are: on the part of the tool; rotation and descent speed, descent depth and diameter, while, on the part of the projection, the diameter was variants. In order to demonstrate the effects of the parameter variation, a metallographic evaluation, mechanical Shear Tension Test (STT) and Vickers microhardness tests were carried out.

**Keywords:** Projection Friction Stir Spot Welding, Steel plates, Welding parameters

## Introducción

En la actualidad existe un gran compromiso por parte del sector industrial a nivel global en disminuir el costo ambiental asociado a los procesos productivos. La industria automotriz, sector de producción en escalas masivas, presenta un gran desafío en reducir el consumo de energía eléctrica dado el entorno competitivo creciente que deben afrontar. El desarrollo de conceptos de diseño más livianos en la industria del automóvil se está convirtiendo en la estrategia clave para afrontar la demanda de ahorro en energía eléctrica impulsando el desarrollo de métodos de producción más eficientes (Mousavizade y Pouranvari, 2018).

La soldadura de puntos por resistencia (RSW, Resistance Spot Welding), por su simpleza y rapidez, es el proceso dominante en la unión de carrocerías en la industria. Sin embargo, requiere de un alto consumo de energía eléctrica. Además, tiene asociada la posibilidad de alcanzar temperaturas superiores al punto de fusión del material, lo que provocaría que el material cambie su estado de agregación de líquido a sólido con gran rapidez, pudiendo ocasionar la aparición de fisuras debido a la rápida contracción del material (Mateos et al., 2021). En este sentido, los procesos de soldadura en fase sólida encuentran una gran oportunidad, siendo capaces de realizar uniones mejor conformadas además de disminuir el consumo eléctrico. En el año 2003 se desarrolló un proceso denominado Friction Stir Spot Welding (FSSW), variante del proceso Friction Stir Welding (FSW), desarrollado en el año 1991 por la The Welding Institute (TWI). El FSSW utiliza una herramienta que gira en contacto con dos placas solapadas generando calor y agitando el material para producir la unión. La herramienta es el componente principal de este proceso y consta de dos partes; el hombro que es el encargado de entrar en contacto con la chapa superior y propiciar la generación de calor y, el pin que se introduce entre las dos chapas y genera el flujo de material plastificado. Sin embargo, presenta una gran desventaja que es la presencia de un hueco (keyhole) provocado por la herramienta, el cual disminuye el área de unión y genera un efecto visual adverso. Para evitar esto, se han desarrollado varios procesos alternativos con el fin de eliminar la presencia del keyhole, entre ellos se encuentra el Projection Friction Stir Spot Welding (PFSSW) (Mateos et al., 2021; Mateos et al., 2022). Al igual que en FSSW, esta alternativa consta de una herramienta que gira en contacto con la placa superior de dos placas superpuestas, generando calor por fricción, mientras que en la parte posterior cuenta con una proyección que incide sobre la placa inferior cuyo propósito es alterar el flujo de material plastificado.

Este trabajo, enmarcado en el estudio de comportamiento de aceros avanzados de alta resistencia, específicamente Dual Phase (DP), plantea como objetivo analizar el efecto producido por diferentes combinaciones de parámetros intervinientes en el desempeño de uniones soldadas en chapas de acero al carbono mediante el proceso PFSSW. Esto permitirá entender de una mejor manera el proceso y marcará un punto de partida para la posterior aplicación en soldadura de acero DP.

## Desarrollo

Se realizaron soldaduras mediante el proceso PFSSW sobre chapas de acero al carbono laminado en caliente de calidad comercial de 0,91 mm de espesor. Las piezas a soldar fueron seccionadas con una longitud de 105 mm y 45 mm de ancho, las superficies en contacto se limpiaron con solvente removiendo suciedad y materia grasa presente, posteriormente se les dio una longitud de solape de 35 mm, siguiendo el procedimiento indicado por la norma AWS D8.1M:2013 "Specification for Automotive Weld Quality – Resistance Spot Welding of Steel". Para su ejecución se utilizó una fresadora universal CNC de 3 ejes modelo Mecatronic con potencia de usillo de 3 HP, en la cual los comandos fueron programados en código G. Se utilizó una herramienta de carburo de tungsteno debido a su gran resistencia, mientras que las proyecciones, al encontrarse sometidas a menores solicitaciones, fueron confeccionadas con acero rápido para herramientas. Las chapas a soldar fueron dispuestas de manera solapada sobre un soporte de acero al carbono que contiene la proyección. Por debajo del soporte se ubicó un transductor de fuerza para mensurar la carga alcanzada al momento de la unión. A fin de evitar el movimiento de las muestras durante la soldadura, las chapas se sujetaron mediante 2 anclajes que realizan una fuerza descendente sobre el soporte, pero que no es detectada por el transductor de fuerza (Figura 1).

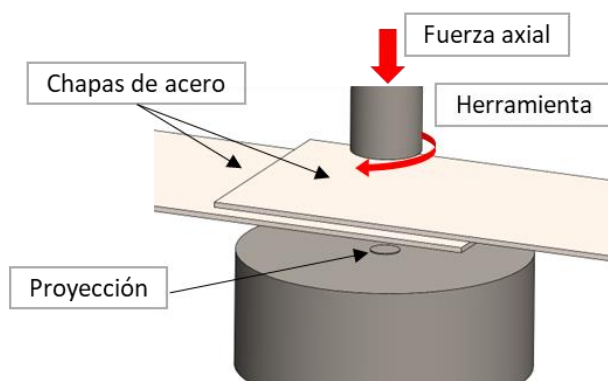


Figura 1: Dispositivo de soldadura

Inicialmente se caracterizó el metal base (MB); del cual se obtuvo su composición química (tabla 1), se realizó metalografía a través de microscopía óptica y la evaluación mecánica a través de ensayos de tracción y dureza Vickers.

Se seccionaron y embutieron muestras de MB a las cuales se les realizó un proceso de desbaste y pulido utilizando papeles de lija 60, 120, 220, 320, 400, y 600 y pasta diamantada de 6  $\mu\text{m}$  y 1  $\mu\text{m}$ . El ataque químico se realizó con Nital 2% (2% de ácido nítrico en alcohol etílico). Posteriormente se obtuvieron micrografías a 500 aumentos en microscopio óptico Digimess modelo XJL-20. Los ensayos de tracción se realizaron en el campo de 50 kN de una máquina universal de ensayos Mod. DWD 600S de 600kN de capacidad con una velocidad de desplazamiento de 10 MPa/s, mediante los cuales se determinó la resistencia al límite proporcional ( $R_p$ ), la carga máxima ( $R_m$ ) y la elongación porcentual ( $A\%$ ). También, se realizaron ensayos de microdureza Vickers con 100 gf de carga ( $HV_{0,1}$ ) para determinar la dureza promedio del material.

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

Tabla 1: composición química MB

Se realizó un relevamiento bibliográfico a partir del cual, considerando las capacidades del herramental disponible en el laboratorio, se determinaron los parámetros y los rangos que serían aplicados en el trabajo experimental. Entre los parámetros geométricos previamente mencionados se decidió combinar diámetros de herramienta ( $D_h$ ) de 12 y 16 mm con diámetros de proyección ( $D_p$ ) de 5 y 10 mm manteniendo la altura de proyección invariante en 0,3 mm. En una primera instancia se realizaron soldaduras combinando estos parámetros con una velocidad de descenso de la herramienta de 2 mm/min y una velocidad de giro de 2.000 RPM. Se realizaron ensayos de corte por tracción (STT, Shear Tension Test), a partir de los cuales se determinó la combinación geométrica óptima a utilizar siendo  $D_h=16$  mm y  $D_p=10$  mm.

En segunda instancia, con el objetivo de disminuir los tiempos de soldadura, la velocidad de descenso se incrementó a 8 mm/min. Al ser evaluadas mediante STT, la carga soportada resultó menor que las anteriores. Con el objetivo de contrarrestar esta caída en la resistencia, se decidió aumentar la velocidad de giro a 3.000 RPM buscando incrementar el calor aportado durante la ejecución (Sarkar et al., 2014). A partir de este cambio, la resistencia al corte se vio incrementada. Además, el incremento de velocidad permitió disminuir drásticamente el tiempo de ejecución de la unión. La tabla 2 muestra la identificación correspondiente a cada una de las combinaciones.

Durante todas las instancias del trabajo experimental se mantuvieron invariantes el tiempo de mantención en 3 s y la carga axial aplicada en 4905 N asociada a una profundidad de descenso determinada en 1,9 mm.

Identificación	Dh (mm)	Dp (mm)	Vd (mm/min)	Vel. Giro (RPM)
H12P5-22	12	5	2	2000
H16P5-22	16	5	2	2000
H16P10-22	16	10	2	2000
H16P10-82	16	10	8	2000
H16P10-83	16	10	8	3000

Tabla 2: combinaciones de parámetros seleccionados

Los ensayos de STT se realizaron en el campo de 50 kN de máquina universal de ensayos Mod. DWD 600S de 600 kN de capacidad con una velocidad de desplazamiento de 1 mm/min. En estos ensayos se observó una muy buena resistencia de las juntas; alcanzando un máximo de 5952 N para las uniones H16P10-22, la cual requirió de un tiempo de 60 s para la ejecución del punto, y logrando resistencias comparables en las uniones H16P10-83, las cuales necesitaron de un tiempo de 17,25 s. La figura 2 muestra la carga resistida por cada tipo de unión. Todas las probetas mostraron un modo de falla interfacial.

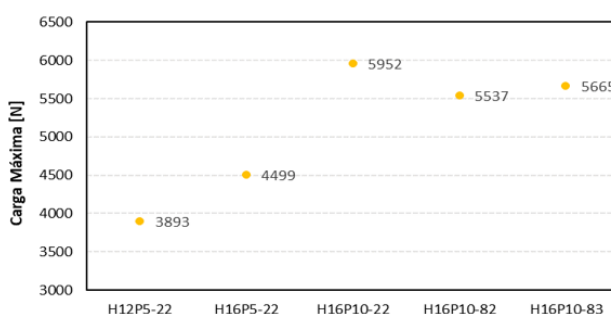


Figura 2: Carga máxima-combinación (STT)

Las probetas destinadas a realizarles metalografía y dureza se sometieron al procedimiento de desbaste y pulido realizado al MB. A partir de las imágenes obtenidas mediante microscopio y lupa estereoscópica se pudo determinar la división de la unión en tres zonas características: Zona Agitada (SZ), Zona Termomecánicamente Afectada (TMAZ) y MB. Como consecuencia de la recrystalización dinámica se evidenció un refinamiento de grano y un gran incremento en la dureza en la SZ (Shahrabadi et al., 2018) y en la TMAZ como consecuencia de la deformación plástica (Zarghani et al., 2017). En la figura 3 se muestra el perfil de microdureza realizado sobre la probeta H16P10-83.

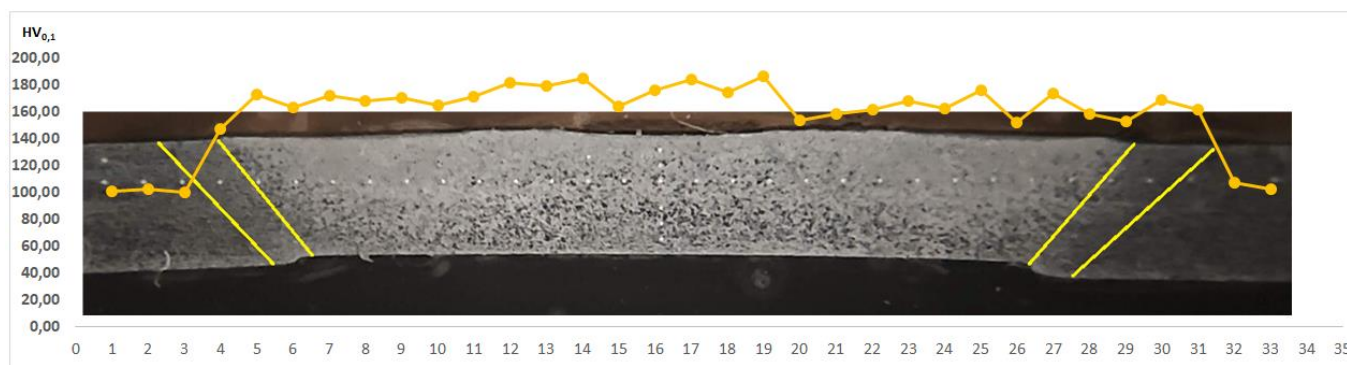


Figura 3: perfil de dureza sobre macrografía

## Conclusiones

Manteniendo los parámetros constantes, para un determinado Dp, la resistencia del punto en STT aumenta con el incremento en Dh. Esto se encuentra fundamentado en que se genera un incremento en la zona de unión, factor del que la resistencia de la junta resulta principalmente dependiente (Mousavizade y Pouranvari, 2018). Por otro lado, manteniendo Dh y Dp constantes la carga soportada disminuye con el incremento de la velocidad y crece con el aumento de las RPM. Esto se debe a que ambos factores están íntimamente relacionados con el calor generado durante la ejecución del punto, el cual es

directamente proporcional a la velocidad de giro de la herramienta (Sarkar et al., 2014). La última combinación ( $D_h=16$  mm,  $D_p=10$  mm,  $V_d=8$  mm/min y 3.000 RPM) logró los mejores resultados; proporcionando una muy alta resistencia, comparable a la máxima alcanzada durante todo el experimental y superando ampliamente la establecida por la norma, reduciendo el tiempo de soldadura a un cuarto del tiempo establecido por la combinación más resistente.

## Referencias

AWS D8.1M:2013 “Specification for Automotive Weld Quality – Resistance Spot Welding of Steel”.

A.A. Mateos, M.J. Castillo, G. Lombardo, et al. (2021) Puesta a punto de la técnica de soldadura por fricción agitación de puntos por proyección.

A. Mateos, M.J. Castillo, G. Lombera, et al, Análisis de las velocidades de descenso y rotación en el desempeño de la soldadura por fricción agitación por puntos con proyección, SAM-CONAMET 2022.

A. R. Shahrabadi, S. M. Mousavizade, H. R. Ezatpour, et al. (2018) Achieving high mechanical performance in protrusion friction stir spot welding (PFSSW) of DQSK steel compared to other techniques.

F. Zarghani, S. M. Mousavizade, H. R. Ezatpour, et al. (2017) High mechanical performance of similar Al joints produced by a novel spot friction welding technique.

R. Sarkar, T. K. Pal y M. Shome. (2014) Microstructures and properties of friction stir spot welded DP590 dual phase steel sheets.

S. M. Mousavizade y M. Pouranvari (2018) Projection Friction Stir Spot Welding: a pathway to produce strong keyhole-free welds, Science and Technology of Welding and Joining.