

“X Congreso Argentino de Ingeniería Industrial”

“Desarrollo de un proceso de soldadura de punto por fricción agitación para la industria naval argentina de pequeño porte”

Pelayo, Marcelo Fabián*; Pascal, Oscar*; Sosa Eugenia*, Lombera Guillermo**, Santiago, Diego**, Carr Gustavo**.

** Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora.
Juan XXIII y Ruta 4. Lomas de Zamora.*

*** Grupo GIAC, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata
Av. Juan B. Justo 2002. Mar del Plata*

RESUMEN.

El presente trabajo se enmarca dentro del programa “Doctorar” destinado a la formación doctoral de docentes regulares de universidades nacionales.

El trabajo presentado se refiere al desarrollo de un proceso innovador, que da respuesta a un problema tecnológico del sector naval argentino de bajo porte. Este problema consiste en la dificultad que presenta el proceso de fabricación actual, para el posicionamiento de las planchas de aluminio a soldar. Dicha actividad se realiza mediante un punteado de las planchas para fijar su posición. Esto obliga a trasladar las torchas a lo largo de todo el barco y a la utilización de personal altamente calificado para realizar esta tarea, lo que impacta fuertemente en el costo. La solución propuesta consiste en el desarrollo de un proceso basado en la utilización de la unión de soldadura denominada Soldadura de Punto por fricción Agitación, conocido también como Friction Spot Stir Welding (FSSW). El problema a resolver es desarrollar un proceso soldadura de punto por fricción-agitación que permita la soldadura de las aleaciones de aluminio utilizadas en espesores de 3, 5 y 10 mm de manera autónoma.

El plan de trabajo propuesto es realizar ensayos con distintas variables operativas y distintas características de herramientas, en espesores de 3 mm. A partir de estos ensayos se determinarán las características del proceso a aplicar para poder soldar espesores de 5 mm y 10 mm. Se utilizará como apoyo métodos de simulación a fin de poder predecir los resultados. La calidad de la soldadura es determinada mediante la medición de los perfiles de dureza y el área efectiva de la unión.

Palabras Claves: Soldadura, Fricción, Agitación, Industria, Naval.

ABSTRACT

The present work is framed within the program "Doctorate" destined to the doctoral formation of regular teachers of national universities.

The present work refers to the development of an innovative process, which responds to a technological problem of the Argentine naval sector of low size. This problem consists of the difficulty presented by the current manufacturing process for the positioning of the aluminum plates to be welded. This activity is done by sticking the plates to fix their position. This requires the transfer of the torches throughout the ship and the use of highly qualified personnel to carry out this task, which impacts heavily on the cost. The proposed solution consists of the development of a process based on the use of the weld joint called Friction Stitch Welding, also known as Friction Spot Stir Welding (FSSW). The problem to be solved is to develop a friction-stir welding process that allows the welding of aluminum alloys used in thicknesses of 3, 5 and 10 mm in an autonomous manner.

The proposed work plan is to perform tests with different operating variables and different tool characteristics, in thicknesses of 3 mm. From these tests will determine the characteristics of the process to be applied in order to weld thicknesses of 5 mm and 10 mm. Simulation methods will be used in order to predict the results. The quality of the weld is determined by measuring the hardness profiles and the effective area of the joint.

TRABAJO FINAL

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de soldadura de punto por fricción agitación, es una variante del proceso de soldadura por fricción (FSW). El mismo se basa en la unión de dos materiales mediante un proceso termo mecánico de agitación [1]. El mismo consiste en una herramienta que posee dos partes un pin y un hombro, cuyas geometrías varían según las propiedades finales que desee obtener. Esta herramienta se posiciona sobre las placas y se la hace girar a una velocidad de rotación determinada. Luego se aplica una fuerza axial que hace que la herramienta penetre las placas a soldar. Mediante un proceso de agitación mecánica que eleva la temperatura las placas se sueldan. Luego de un tiempo de aplicación la herramienta se retira.

Este método presenta como ventajas que se puede realizar en estado sólido, posee un menor consumo de energía en el procedimiento, la zona afectada por el calor es muy pequeña, y posee una menor distorsión y tensión residual respecto a otros métodos de soldadura.

Además se puede soldar aluminio fácilmente y casi no hay defectos de soldadura.

El proyecto desarrollado en el presente trabajo se enfoca en la determinación de las variables de un método de FSSW (soldadura por fricción punto agitación) para la aplicación en la industria naval argentina de pequeño porte.

El objetivo final del proyecto de investigación es encontrar los parámetros óptimos que permitan soldar espesores mayores a 3mm los cuales son usados en la industria naval argentina de pequeño porte.

1.1 PROCEDIMIENTO DE LA FSSW

La soldadura de punto por fricción agitación también, fue desarrollada por Mazda, quien informó de la primera aplicación de esta tecnología (FSSW) en su modelo 2003 RX - 8, un automóvil de producción en masa. La puerta trasera de este vehículo, que es de Aluminio, fue soldada enteramente por soldadura de punto por fricción agitación.

Dos variantes distintivas del proceso de FSSW han sido reportadas en la literatura abierta. El primer enfoque, utilizado por Mazda, que emplea una geometría de la herramienta con un pin fijo, el pasador sobresale dejando un agujero de salida, el cual es característico, en el medio de la soldadura de punto realizada [1].

El segundo enfoque utiliza distintos mecanismos a fin de eliminar la existencia del agujero dejado por la herramienta, ya sea delicados movimientos relativos del pin y el hombro para que vuelva a llenar el agujero dejado por la herramienta, ya sea con la eliminación del pin de la herramienta o ya sea con la realización de la soldadura de punto por fricción agitación en dos etapas. Basado en la información disponible, el segundo enfoque exige un relativamente largo tiempo de procesamiento para acomodar los movimientos complejos de la herramienta para rellenar el agujero. De acuerdo a los trabajos realizados, se puede ver que en comparación, el método tradicional original es muy rápido, para aleaciones de Aluminio, que es el método más desarrollado de esta tecnología, una soldadura de punto por fricción agitación, puede hacerse en menos de un segundo. Además, las máquinas de soldaduras existentes y el sistema de control para la ubicación de la herramienta con el pin, es simple y fácil de integrar en una producción en masa, de grandes volúmenes, como una línea de montaje [2].

En el caso de Mazda, la utilización del sistema de soldadura por fricción agitación, reportó más del 90 por ciento de ahorro y más del 40 por ciento del capital involucrado en la energía de operación, además de reducciones de inversión. Todo esto en comparación con la soldadura por puntos convencional utilizada para la unión de aleaciones de Aluminio [3].

El proceso de soldadura de punto por fricción agitación es aplicable a todas las aleaciones de aluminio [4].

Este proceso consiste en un el posicionamiento de una herramienta compuesta por un Pin y un hombro (Shoulder), la cual se monta sobre una fresadora o cualquier otro herramental que permita la rotación de la herramienta y un movimiento axial con una carga predeterminada. Luego se baja la herramienta sobre el material base a soldar que generalmente consiste en una placa inferior y una placa superior. La herramienta se fija a una velocidad de rotación determinada y se inicia la penetración sobre la placa con una determinada carga axial, lo que genera una agitación del material durante un tiempo determinado, que es una variable determinante en las propiedades finales de la unión soldada. Luego se levanta la herramienta y la pieza queda soldada por los efectos de la agitación de los materiales. Una placa de soporte se utiliza en el lado inferior de las placas a soldar, de apoyo a la carga aplicada, para evitar que la carga aplicada deforme las mismas. En este proceso a diferencia del método de soldadura por fricción (FSW), ninguna traslación lineal se le da a la herramienta. Al retirarse la herramienta, y tal como se ve en la parte

C de la Figura 1, queda un agujero característico (Weld Keyhole) el cual no resulta estético y genera algunos problemas en las propiedades finales de la soldadura. Un ejemplo del proceso se puede en forma esquemática en la Figura 1.

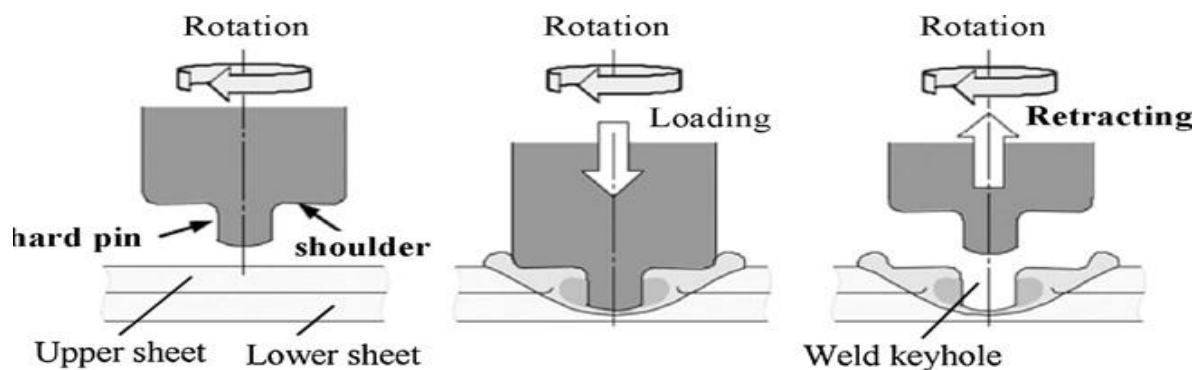


Figura 1. Esquema de un proceso de FSSW

Las variables más importantes de este proceso se pueden destacar son la velocidad de rotación, la carga axial, la velocidad de penetración, el tiempo de residencia, la herramienta utilizada, el espesor a soldar, las características del anclaje, la preparación de las juntas y la penetración del pin [5].

En cuanto a la herramienta las características principales que influyen en la soldadura son la geometría de la herramienta (cónica, roscada, cilíndrica), la altura del pin, el diámetro del pin, el diámetro del hombro y la forma del hombro y el pin [6].

1.2. INDUSTRIA NAVAL EN ARGENTINA DE PEQUEÑO PORTE

En cuanto a la industria naval liviana podemos decir que se utiliza en la actualidad para embarcaciones de consumo final, mayormente para recreación. La producción de embarcaciones livianas tuvo un gran crecimiento entre 2003 y 2007, alcanzando el 158% superando a la industria manufacturera que fue del 58%.

En ese mismo periodo de tiempo, la cantidad de empleados en el rubro naval se había duplicado.

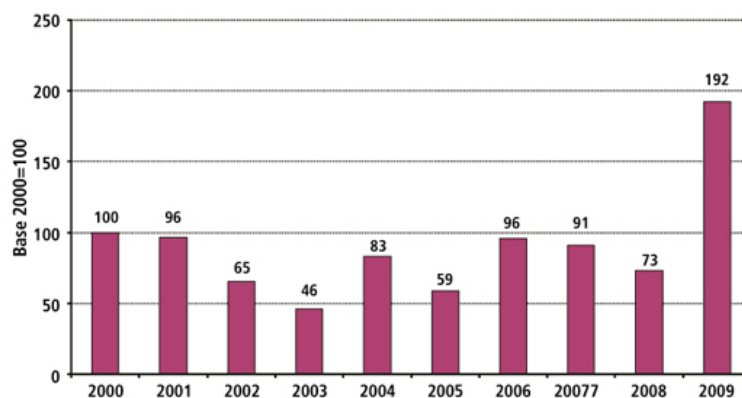


Figura 2. Crecimiento de la industria naval en Argentina [7]

Este tipo de embarcaciones son fabricados mediante un proceso que combina una estructura reticular de perfiles de Aluminio de aleación AA 6082. En dicha estructura se monta el perfil para armar el armazón y se realiza la fijación por punteo para posicionar los perfiles. Luego se realiza la soldadura estructural.



Figura 3. Perfil soldado

Una vez terminada la estructura se colocan las chapas con las que se termina la estructura. Dichas chapas son de aluminio de aleación AA 5083. Estas chapas se fijan mediante un punteo y luego de posicionarlas se les realiza la soldadura estructural.



Figura 4. Chapas de aluminio para la formación de la carcasa

2. PROBLEMA A RESOLVER

La tecnología actual que se utiliza para el armado de las naves presenta algunos aspectos que complican el proceso de fabricación. El tipo de soldadura utilizada es la soldadura MIG, la cual se usa tanto para el posicionamiento de las piezas, como para dar la soldadura estructural al barco. Este procedimiento requiere de mano de obra especializada y el movimiento constante de los equipos con sus torchas a lo largo todo el espacio de trabajo ya sea, para el proceso de posicionamiento, como para el proceso de soldadura final. El proceso así establecido de fijación necesita mucho tiempo y recursos, lo que hace que, el proceso actualmente utilizado para la construcción sea costoso y complejo.

Por lo tanto lo que se busca es reemplazar el proceso de posicionamiento actual por una fijación mediante un proceso de soldadura de punto por fricción- agitación, mediante el uso de una herramienta autónoma, lo que simplificaría el proceso y disminuiría los costos de fabricación.

Lo primero que se debería resolver para poder implementar esta solución es determinar los parámetros y herramientas que permitan soldar espesores de 3 mm y superiores, ya que son los utilizados en este tipo de industria.

3. METODOLOGIA DE TRABAJO

3.1 MATERIALES A SOLDAR

Los perfiles utilizados, como se dijo anteriormente, de aluminio AA 6083 T6. El mismo posee las siguientes propiedades:

Tabla 1. Composición química y propiedades de la aleación 6082

COMPOSICIÓN QUÍMICA											
%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros elementos		Al
Mínimo	0,70			0,40	0,60						
Máximo	1,30	0,50	0,10	1,00	1,20	0,25	0,20	0,10	0,05	0,10	El resto
PROPIEDADES MECÁNICAS TÍPICAS (a temperatura ambiente de 20°C)											
Características a la tracción											
Estado	Carga de rotura Rm. N/mm ²		Límite elástico Rp 0,2. N/mm ²	Alargamiento A 5,65%	Límite a la fatiga N/mm ²	Resistencia a la cizalladura τ N/mm ²			Dureza Brinell (HB)		
T6	340		310	11	210	210			95		

Las chapas de la armadura son de aluminio AA 5083 H111. Las propiedades del mismo son:

Tabla 2. Composición química y propiedades de la aleación 5083 H111

COMPOSICIÓN QUÍMICA										
%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros elementos	Al
Mínimo				0,40	4,00	0,05			Zi + Total	
Máximo	0,40	0,40	0,10	1,00	4,90	0,25	0,25	0,15	Ti 0,15	El resto

PROPIEDADES MECÁNICAS TÍPICAS (a temperatura ambiente de 20°C)							
Estado	Características a la tracción				Dureza		
	Carga de rotura Rm. N/mm ²	Límite elástico Rp 0,2, N/mm ²	Alargamiento A 5,65%	Límite a la fatiga N/mm ²	Resistencia a la cizalladura τ N/mm ²	Brinell (HB)	Vickers
0/H111	300	145	23	250	175	70	

3.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Todos los trabajos fueron realizados por una fresa de control numérico Marca CHEVALIER, mesa de 1370 X 330 mm; recorrido X 1020 ; Y 510; Z 580 mm; Husillo BT 40 con servomotor 10 HP; control Autocom Dinapath Delta ;PC adicional exclava; morsa de precisión Vertex ancho 200 ,abertura 250/500 mm.

Las variables analizadas fueron las siguientes:

- Tipo de material
- Velocidad de rotación
- Tiempo de residencia
- Tipos de Herramientas
- Espesor a soldar

La herramienta utilizada posee un hombro y un pin. El pin es la parte que entra en contacto produciendo la fluidificación del material produciendo un efecto de extrusión sobre las placas, mientras que el hombro retiene el material que asciende generando la fluidificación del material y la soldadura del mismo [6].

En el caso de la herramienta, en la misma se han variado la geometría del pin (se ha utilizado geometría cilíndrica y cónica), el tamaño del pin (diámetro y altura) y el diámetro del hombro.

El pin es el que estará en contacto con las placas a soldar.

Las variables de salida que se esperan tener son las que se muestran a continuación

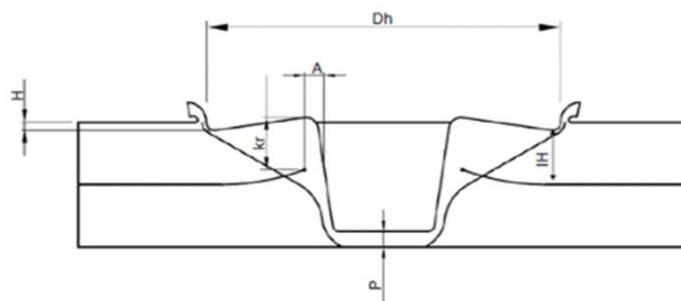


Figura 5. Partes de la soldadura de punto por fricción- agitación

Primero tendremos los parámetros geométricos de la soldadura:

- El diámetro del hombro de la herramienta se denominó como Dh.
- La posición vertical del hook (punto donde comienza la unión metalúrgica) se define como la distancia entre dicho hook
- La superficie de la chapa superior (Kr).

- La longitud de unión efectiva (A) es la distancia horizontal comprendida entre la superficie libre del orificio dejado por el pin y el hook.
- La indentación de la herramienta (H), es la distancia entre la superficie de la chapa superior y el punto más bajo alcanzado por el hombro de la herramienta.
- El espesor remanente de la chapa inferior debido a la acción del pin se denominó P. La distancia entre el punto inferior del hombro y la interface de las chapas es IH.

Además, los datos que se obtendrán serán:

- Barrido de Dureza en las distintas zonas de soldadura.
- Resistencia Mecánica de la soldadura. (Cualitativa).
- Estructura metalográfica obtenida en las distintas zonas (solo los primeros ensayos).
- Tamaño de la zona efectiva.



Figura 6. Proceso de soldadura en dos placas de Aluminio

3.3 ENSAYOS

3.3.1 PRIMEROS ENSAYOS

En el caso de los primeros estudios se buscó relacionar la variación de la micro dureza con la variación de espesores, de manera de indicar si la variación de los espesores influyen sobre las propiedades finales del material.

Por otra parte se evaluó la variación de los perfiles de dureza con el cambio de aleación, para analizar si el proceso modificaba sustancialmente la estructura de las aleaciones tratadas.

Se evaluó también el efecto del cambio de la herramienta en especial con distintas relaciones de diámetro de hombro y diámetro de pin.

Se trabajó con espesores se trabajó con espesores entre 1 y 2,5 mm y muestras de 25 mm de ancho y 100 mm de largo soldadas en junta solapada.

En la Tabla 4 se puede observar que la variación de espesores para la misma aleación presenta cambios en los perfiles de dureza.

Se observó el mismo espesor, la misma herramienta y las mismas variables de trabajo, las aleaciones mantienen sus mismos perfiles de dureza. Por lo que no se detectan cambios estructurales significativos por efecto del proceso de soldadura.

En la Figura 7, se puede ver que se confirmó que para las mismas variables y la misma herramienta los perfiles cambian con el espesor a soldar, También se ha observado que en las aleaciones endurecidas por solución sólida presentan un perfil de dureza más plano. Lo que se corresponde con lo referido en la bibliografía [8].



Figura 7. Espesor vs dureza H1

Figura 8. Espesor vs dureza H2

También se analizaron las distintas estructura metalográfica las cuales coinciden con las estructuras declaradas por la bibliografía existente en el estado del arte tal como se indica en la Figura 9 [6].

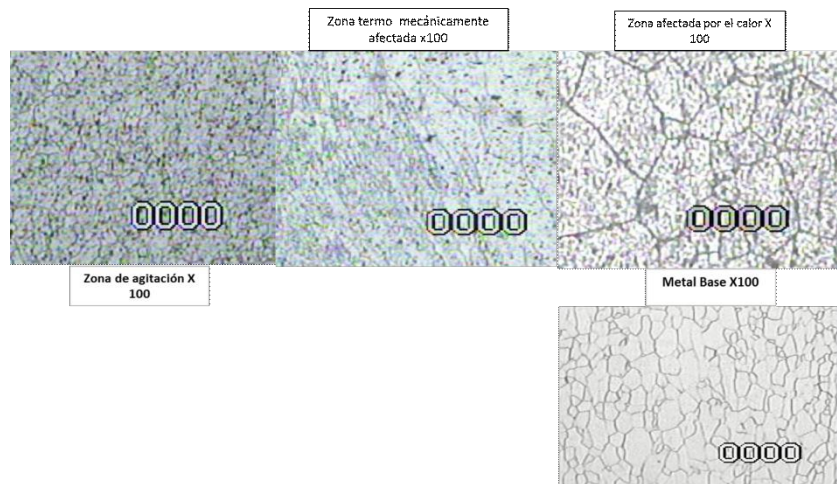


Figura 9. Estructuras de las distintas zonas presente. 100x

3.3.2 SEGUNDOS ENSAYOS

Para la realización de los segundos ensayos, se planteó un diseño de herramientas en función de los datos tomados de la bibliografía ya publicada [9].

En este caso, el diámetro del pin es igual a los espesores a soldar. La altura del mismo debe ser un 80% de la suma de los dos espesores. El diámetro del hombro, si bien no tendrá mucha influencia, se lo toma como el doble del diámetro del pin.

Estos ensayos se realizaron con placas de espesores de 1,2 mm, 1,7 mm y 3,1 mm.

Se tomaron los valores de micro dureza para cada muestra en diferentes zonas, tal como se ve en la Figura 10.

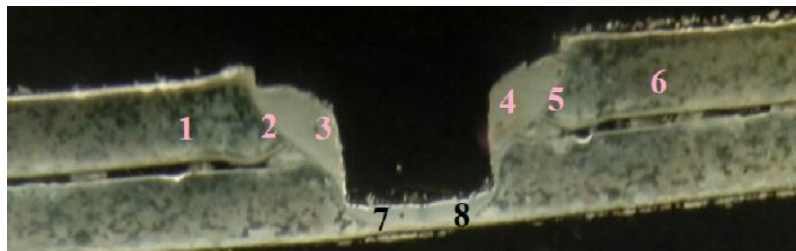


Figura 10. Referencias para la toma de microdureza

En la Tabla 3 se puede ver un resumen del barrido de microdureza de las distintas muestras analizadas. También se indican los parámetros con los que se realizaron los ensayos, siendo las medidas en mm, la velocidad de rotación en RPM y el tiempo de permanencia en segundos.

Tabla 3. Barrido de microdurezas. Segundos ensayos

muestra	zonas								Herramienta	Espesor	Vrot.	Tr
	1	2	3	7	8	4	5	6				
m1	96,8	92,9	83,2	51,2	71	75,8	88,3	96,9	Cónica	1,2	1000	3
m2	98,6	93,3	101	89,4	96	101	98,7	91,9	Cónica	1,2	1000	5
m3	60,6	60,2	53,3	56	58	57,7	64,9	64,7	Cónica	1,2	2000	3
m4	62,9	65,8	57,7	70,6	64	61,6	69,3	79,4	Cónica	1,2	2000	5
m5	45	43	46	63	68,7	43,4	47	45	Cónica	1,7	1000	3
m6	38,6	40	63	48	53	52	42	39	Cónica	1,7	1000	5
m7	40,1	53	51,4	39	36	43	37,9	48	Cónica	1,7	2000	3
m8	37	41	45	21	31	39	41	34	Cónica	1,7	2000	5
m9	94,5	93	90	99,3	99,4	78	102	77,8	Cilíndrica	1,2	1000	3
m10	85,4	77	68	78,8	79	70	77	89	Cilíndrica	1,2	1000	5
m11	69	60,4	60,8	64,1	67	57	66	75,8	Cilíndrica	1,2	2000	3
m12	64,5	56	61	59,7	59	53	62,7	66,3	Cilíndrica	1,2	2000	5
m21	70,6	70,2	70,4	80,2	76,5	71	66,4	67	Cilíndrica	3,1	1000	3
m22	58	61,6	68	68,9	68,9	55,8	52	50	Cilíndrica	3,1	1000	5
m23	69	72	70	73,5	74	78	80	78	Cilíndrica	3,1	2000	3
m24	67	72,4	70,9	70,9	76	70	60	55,4	Cilíndrica	3,1	2000	5

Para el caso de los espesores de 1,2 mm utilizando herramientas cónicas, los resultados pueden verse en la Figura 11. Mientras que para el mismo espesor, pero utilizando herramientas cilíndricas, los valores obtenidos pueden verse en la Figura 12.

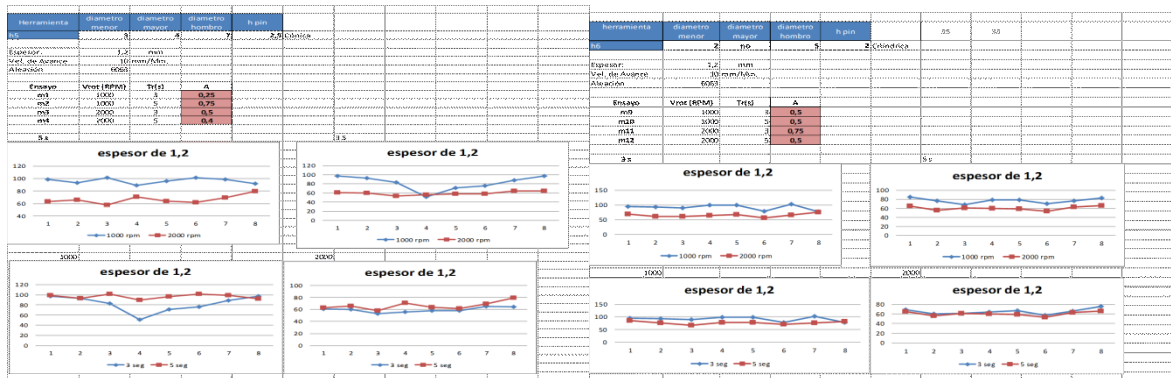


Figura 11. Herramientas cónicas

Figura 12. Herramientas cilíndricas

Las herramientas cónicas arrojan mejores resultados en los perfiles de dureza con un tiempo de permanencia de 5 segundos. Mientras que las herramientas de geometría cilíndrica lo hacen con tiempos de 3 segundos.

Se puede observar que para espesores de 1,2 mm, se obtienen mejores resultados en cuanto al área efectiva utilizando herramientas cilíndricas.

Tal como puede verse en las figuras 11 y 12 podemos concluir que para espesores de 1,2 mm los mejores perfiles de dureza se obtienen a menores valores de velocidad de rotación. Mientras que para la variación del tiempo de residencia no modifica demasiado los perfiles de dureza. Ambas comprobaciones se cumplen tanto para una geometría de la herramienta cilíndrica, como una geometría cónica.

Para el caso de los ensayos para los espesores de 1,7 mm utilizando herramientas cónicas, los resultados pueden observarse en la figura 13.

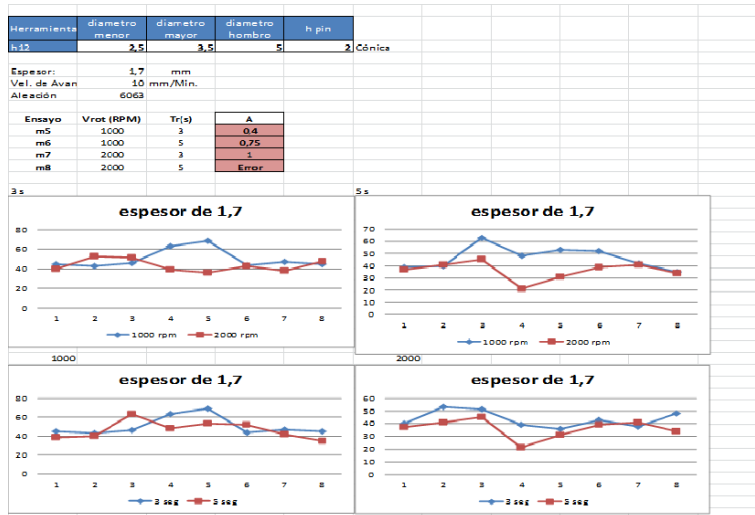


Figura 13. Herramienta cónica. 1,7 mm

Observando los resultados de los ensayos en las tablas 7, 8 y 9, se ve que para espesores de 1,2 y 1,7 mm, la geometría de la herramienta no tiene mayor influencia en la dureza y en el área efectiva de la soldadura.

Finalmente, para espesores de 3,1 mm con herramientas cilíndricas los resultados fueron los siguientes

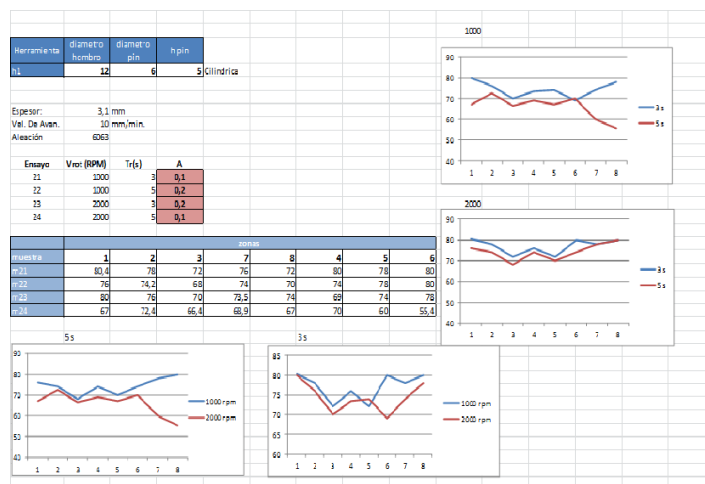


Figura 14. Espesor 3,1 mm

Vemos los espesores de 3,1 mm arrojan resultados de dureza erráticos, por lo que se puede concluir que la herramienta utilizada no sería la adecuada. Para todos los espesores los mejores perfiles de dureza se obtienen cuanto más baja es la velocidad de rotación. Se ve también que el tiempo de residencia de la herramienta no tiene gran influencia en estos parámetros.

Como en los ensayos para espesores de 3,1 mm se redujo el área efectiva, por lo que se puede ver que la relación de la herramienta es válida solo para espesores de hasta 2mm.

Podemos concluir de esta segunda serie de ensayos que para todos los espesores, tendremos mejores perfiles de dureza a baja velocidad, como se puede ver en las tablas 7, 8, 9 y 10. En todos los casos, tanto el tiempo de residencia como la geometría de la herramienta no influyen en la dureza del material soldado.

Las relaciones en la herramienta que se presentan en la bibliografía, no dan un buen resultado en relación con las áreas efectivas obtenidas.

2.3. TERCEROS ENSAYOS

Tomando las experiencias anteriores, el tercer grupo de ensayos se realizaron bajo una redefinición de las relaciones del diámetro del hombro y del pin. Se han utilizado placas de aluminio de aleación 6082 de 3 mm de espesor. Las herramientas utilizadas solo fueron de geometría cilíndrica.

En la tabla 4 se muestra un resumen de los parámetros utilizados para los nuevos ensayos. En la tabla 5 se detallan las nuevas medidas de las herramientas.

Tabla 4. Parámetros utilizados

MUESTRA	ESPESOR	ALEACION	HERRAMIENTA USADA	VELOCIDAD	TIEMPO DE PERMANENCIA
M1	3		H1	1000	3
M2	3		H1	1000	5
M3	3		H1	2000	3
M4	3		H1	2000	5
M5	3		H2	1000	3
M6	3		H2	1000	5
M7	3		H2	2000	3
M8	3		H2	2000	5
M9	3		H7	1000	3
M10	3		H7	2000	3
M11	3		H7	2000	3
M12	3		H11	1000	3
M13	3		H11	1000	5
M14	3		H11	2000	3
M15	3		H11	2000	5

Tabla 5. Medidas de las herramientas

Herramientas	Cilindrico			
	φ Hombro	φ Pin	Altura Pin	Relación φ Hombro/ φ Pin
H1	12,4	3,1	3	4
H2	12,4	4,1	4	3
H7	19	6,1	4	3
H11	19	4,5	4	4

En la Figura 15 se muestran las zonas en la que se tomó la microdureza de cada muestra.

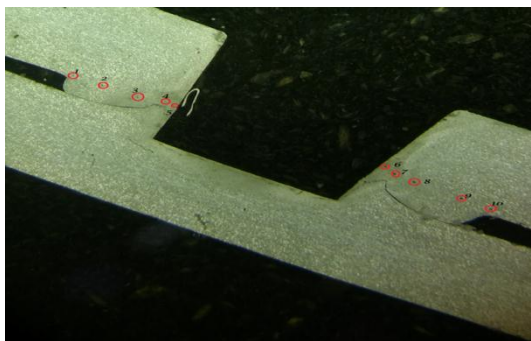


Figura 15. Zona de microdureza.

Podemos ver en las tablas 6, 7, 8 y 9 el comportamiento de los perfiles de dureza según la herramienta.

Tabla 6. Perfil de microdureza

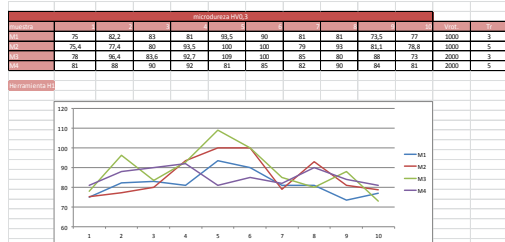


Tabla 7. Perfil de microdureza

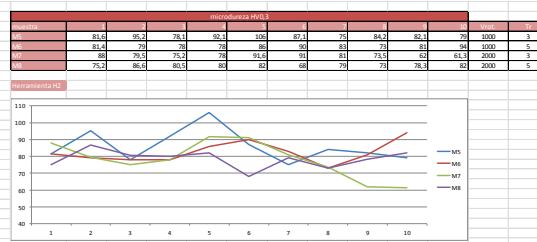


Tabla 8. Perfil de microdureza

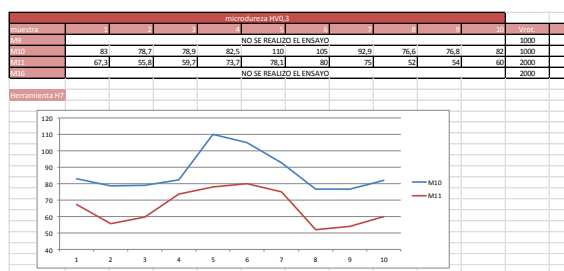
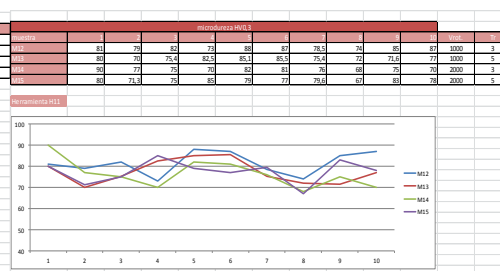


Tabla 9. Perfil de microdureza



En la tabla 10, se detallan las medidas de las áreas efectivas en cada caso:

Tabla 10. Área efectiva

MUESTRA	MEDIDA "A"(MM)
M1	0
M2	0,2
M3	0,3
M4	0,5
M5	0,2
M6	0,6
M7	0,5
M8	0,3
M9	0
M10	0,2
M11	0,1
M12	0,1
M13	0,1
M14	0,1
M15	0,1

En esta etapa se comprobó que las mejores áreas efectivas se lograron con la herramienta H2. En cuanto a un análisis macroscópico se puede ver que también los mejores botones fueron logrados con esta herramienta.

En este tipo de soldadura solo tenemos que lograr que la chapa o el perfil se auto soporte. En cuanto esto los mejores resultados cualitativos fueron logrados con H2.

Es importante tener en cuenta la variación de la microdureza y sobre todo los puntos más bajos, ya que son los responsables de la rotura del botón. Dichos puntos se dan en la zona termo mecánicamente afectada. En esta serie de ensayos, no han aparecido puntos de extremadamente baja dureza.

Es importante tomar en cuenta el área total del pin que entra en contacto como una variable adicional.

En espesores de 3 mm, los mejores resultados se obtuvieron con la herramienta H2, como se puede observar en la tabla 14.

4. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Podemos ver en estas tres series de ensayos que el área efectiva y la dureza de las zonas de soldadura son sensibles a la variación de espesores. De hecho se comprobó que a espesores altos los resultados de la soldadura no resultan claramente predecibles.

En este caso es importante evaluar el tamaño de la zona efectiva de soldadura ya que los requerimientos mecánicos son mínimos para el uso previsto. Si bien se ha observado que los mejores valores se presentan de dureza con velocidades de rotación bajas, para espesores altos el área efectiva lograda es muy pequeña y resulta muy difícil lograr un botón de características adecuadas. Se entiende que esto puede suceder debido a un mala fluidificación del material por la alta superficie de contacto.

Es también un resultado de estos ensayos que los valores de tiempo de residencia no influye demasiado en las características finales de la soldadura.

En cuanto a las herramientas utilizadas se observó la importancia de la relación entre el área del pin y el área del hombro, siendo la mejor relación en un valor cercano a 1.

Por otra parte se ha logrado mejores valores de micro dureza y áreas efectivas para espesores altos, con relaciones de diámetro de hombro sobre diámetro de pin de 3.

Si bien no es definitivo se vió que los mejores valores de área efectiva se lograron con geometría cilíndrica del pin.

5. CONCLUSIONES

Se puede concluir finalmente que:

- Las velocidades bajas de rotación presentan una dificultad para soldar espesores altos.
- Se debe diferenciar bien entre un buen perfil de dureza y el área efectiva, ya que en este caso nos interesa que la soldadura pueda auto soportarse. Por lo tanto es el área efectiva el que asegura que se mantenga la unión.
- El perfil de dureza da una idea de la resistencia de la zona soldada.
- Se observó una relación entre el área del pin y el área del hombro. La mejor dio 1. Siendo la menor de todas las herramientas.
- Se observó la mejor relación entre diámetro de hombro y diámetro de pin es el de 3.
- Se observó que el tiempo de residencia no es un factor relevante para los resultados de la soldadura lograda.
- Se observó que los espesores son una variable crítica para los resultados de la soldadura obtenidos.
- Por último podemos concluir que para lograr un buen resultado para la aplicación de este tipo de soldadura, se debería soldar espesores altos a velocidades de rotación de 2000 rpm, un tiempo de residencia de 3 s y como herramienta utilizar una que posea una relación de área de pin vs área de hombro de 1 y una relación de diámetro de hombro vs diámetro de pin de 3. La mejor geometría sería para este tipo de espesores una geometría cilíndrica del pin.

6. REFERENCIAS

- [1] Mishra; Z. Y. Ma. (2005). "Friction stir welding and processing". *Materials Science and Engineering*. Volúmen 50, número 1-2, páginas 1–78. USA.
- [2, 4] Bharat Raj Singh. (2012). *A Handbook on Friction Stir Welding*. UK. Primera Edición. LAP Lambert Academic Publishing. UK.
- [3] Fujimoto, Koga, Abe, Sato, Kokawa, (2008). "Microstructural analysis of stir zone of Al alloy produced by friction stir spot welding". *Science and Technology of Welding and Joining*. Volúmen 13, número 7, páginas 663-670.UK.
- [5] Buffa; Fratini ; Piacentini. (2008). "On the influence of tool path in friction stir spot welding of aluminum alloys". *Journal of materials processing technology*. Volúmen 208, número 1, páginas 309-317.
- [6] Nguyen; Kim; (2011). "Assessment of the failure load for an AA6061-T6 friction stir spot welding joint", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers B: Journal of Engineering Manufacture*. Volumen 225, número 10, páginas 1746–1756.
- [7] Hybe, (2010). "Una industria que se mantiene a flote". Saber Cómo. Número 95, <https://www.inti.gob.ar/sabercomo/sc95/inti10.php>.INTI Online.
- [8] Rosendo, Parra, Tier, Da Silva, Dos Santos, Strohaecker, , Alcântara, N. G. (2011) "Mechanical and microstructural investigation of friction spot welded AA6181-T4 aluminium alloy". *Materials and Design*. Volúmen 32, número 3, páginas 1094–1100. USA.
- [9] Cox, Gibson, Strauss, Cook, (2012). "Effect of pin length and rotation rate on the tensile strength of a friction stir spot-welded al alloy: A contribution to automated production". *Materials and Manufacturing Processes*. Vol. 27, no.4, pp. 472–478. Online.