

## EFFECTO DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA PLASMA (PAW) SOBRE LA MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN CHAPA FINA DE ACERO

J. M. Piccini <sup>(1)</sup> y H. G. Svoboda <sup>(1,2,3)</sup>

(1) Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA.

(2) Laboratorio de Materiales y Estructuras, INTECIN, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA.

(3) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), ARGENTINA.

E-mail (autor de contacto): [hsvobod@fi.uba.ar](mailto:hsvobod@fi.uba.ar)

### RESUMEN

*El proceso de soldadura plasma (PAW) es un proceso por arco eléctrico de alta densidad de energía que se encuentra en el rango de aplicación de los procesos de soldadura laser (LW) y de soldadura por haz de electrones (EBW) con un costo significativamente menor. Una de sus principales aplicaciones es en soldadura de chapa fina sin aporte de material, lo que lo hace especialmente interesante para su uso en elementos estructurales de la industria automotriz, particularmente para la construcción de tailor welded blanks (TWB). En estas aplicaciones las propiedades mecánicas de la unión se encuentran fuertemente asociadas por el aporte térmico introducido durante la soldadura y el consecuente desarrollo de la zona afectada por el calor (HAZ). El proceso PAW (Plasma Arc Welding) presenta un mayor número de variables que los procesos convencionales de soldadura por arco eléctrico y es particularmente sensible a la variación de dichos parámetros. En particular la velocidad de soldadura presenta relación directa con el aporte térmico y a su vez es un parámetro operativo de gran importancia, ya que controla la productividad así como la generación de defectos. Son escasos los estudios sistemáticos realizados sobre este proceso aplicado a este tipo de materiales en espesores finos. El objetivo del presente trabajo fue estudiar el efecto de la velocidad de soldadura en el proceso PAW sobre la evolución microestructural y las propiedades mecánicas de uniones soldadas en chapa fina de 1mm de espesor de acero al carbono, a fin de analizar las relaciones variables-microestructura-propiedades. A este fin se soldaron probetas de chapa de acero al C-Mn variando la velocidad de soldadura entre 6,7 y 13,3 mm/seg. Se caracterizó la macro y microestructura y se determinaron perfiles de microdureza Vickers a lo largo de toda la unión, se evaluó la resistencia mecánica de la junta con un ensayo de tracción, como así también, la conformabilidad con un ensayo Olsen, para las diferentes condiciones analizadas. Se observaron variaciones significativas en los tamaños de las diferentes zonas al variar los parámetros. En todos los casos la dureza aumentó monótonamente desde el metal base hacia el cordón de soldadura, observándose variaciones entre las distintas probetas soldadas. Estas observaciones fueron consistentes con los resultados del ensayo de tracción donde las fracturas se produjeron en el material base. El índice de embutido fue elevado mostrando en las mejores configuraciones muy buenos resultados ( $I_c=0,9$ ), superior al obtenido en otros procesos de soldadura. Las probetas soldadas con mayor velocidad presentaron los menores tamaños de HAZ y WM, así como las mejores propiedades mecánicas.*

**Tópico:** 2

**Palabras clave:** acero, PAW, microestructura, ZAC, propiedades mecánicas

### 1. INTRODUCCIÓN

El proceso de soldadura Plasma PAW (Plasma Arc Welding), es un proceso de soldadura por arco eléctrico de alta densidad de energía comparado con los procesos convencionales de soldadura por arco eléctrico. Esta elevada densidad de energía, hace que el proceso de soldadura plasma sea comparable con procesos como los de soldadura por haz de electrones (EBW) y soldadura láser (LW), pero con un costo significativamente menor. El arco eléctrico en PAW es colimado debido a la acción convergente de un orificio en la tobera de gas y solo se expande levemente alcanzando una mayor longitud de arco [1]. Este proceso presenta aplicaciones en la soldadura de todo tipo de materiales (especialmente aceros inoxidables y aluminio) en

industrias aeroespacial y química. A su vez, la soldadura plasma es aplicada en uniones de acero al carbono en la industria automotriz [2]. Una de las grandes ventajas del proceso PAW es la posibilidad de suprimir el uso de material de aporte en un número mayor de casos que en el proceso GTAW. En este proceso es posible soldar chapas de hasta 10 mm de espesor en una única pasada. Asimismo, presenta una mayor tolerancia en la variación de la distancia pieza-torcha y una mayor eficiencia térmica de fusión, resultando soldaduras de menor volumen, menores niveles de tensiones residuales o distorsiones y menores zonas afectadas por el calor (ZAC), requiriendo además una menor habilidad del soldador. A su vez, como limitación el mayor costo de la torcha, de sus consumibles y de los demás equipamientos requeridos. El arco mucho más concentrado requiere tolerancias más estrechas en la preparación y fijación de la junta a ser soldada. Además presenta un mayor número de variables a regular [2,3].

Las propiedades de las uniones soldadas se encuentran, en muchos casos, controladas por las características de la ZAC, particularmente en los aceros modernos de alta resistencia. Durante la soldadura el calor aportado por el arco eléctrico genera ciclos térmicos de calentamiento y enfriamiento, lo que da lugar a la formación de la ZAC, define su extensión y afecta las propiedades de la misma. El procedimiento de soldadura presenta una fuerte influencia sobre dichos ciclos térmicos y por lo tanto sobre la evolución microestructural y las propiedades finales de la unión. La soldadura de chapa fina presenta inconvenientes adicionales que se traducen en una ventana de proceso más acotada. En particular la velocidad de soldadura presenta relación directa con el aporte térmico y a su vez es un parámetro operativo de gran importancia, ya que controla la productividad así como la generación de defectos. A pesar de presentar ventajas sobre otros procesos de soldadura, son escasos los estudios realizados sobre la influencia de las variables del proceso en la evolución de la microestructura y en las propiedades de la unión obtenida.

El objetivo de este trabajo es estudiar la influencia de la velocidad de soldadura sobre las características geométricas, la evolución microestructural de la junta y las propiedades mecánicas obtenidas.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para poder lograr el cumplimiento del objetivo del trabajo, se partió de chapa de acero al C-Mn de 1 mm de espesor. Se determinó su composición química mediante espectrometría de emisión óptica (OES) y se caracterizó la microestructura determinándose las fases presentes, mediante microscopía óptica (LM). Se midió la microdureza Vickers (HV) según la norma ASTM E 384 y se determinaron las propiedades en tracción según la norma ASTM E8M. Se evaluó la conformabilidad mediante el ensayo de embutido tipo Olsen de acuerdo a la norma ASMT E 643.

Posteriormente se soldaron probetas de 120x120 mm a tope mediante el proceso plasma (PAW), empleando diferentes configuraciones operativas a fin de estudiar la influencia de la velocidad de soldadura, la cual se varió entre 6,7 y 13,3 mm/seg. En la tabla 1 se muestran las diferentes configuraciones empleadas.

**Tabla 1.** Parámetros de soldadura empleados en las distintas probetas soldadas.

Probeta	V (mm/seg)	I (A)	V (V)	d p-p (mm)	Diam Elec. (mm)	Ang Torcha (°)	Q g pl (l/min)	Q g pr (l/min)
7	6,7	60	34	4,5	2,4	110	0,55	10
10	10,0	60	35	4,5	2,4	110	0,55	10
11	11,1	60	36	4,5	2,4	110	0,55	10
13	13,3	60	36	4,5	2,4	110	0,55	10

El retroceso del electrodo fue de 1 mm, el diámetro del orificio fue de 1,25 mm y el ángulo del electrodo de 50. Los parámetros de soldadura fueron determinados de manera de obtener una junta sin defectos. Se utilizó un respaldo de aluminio de 5 mm de espesor y no se empleó material de aporte. Como gas de protección se empleó una mezcla de Argón-5%Hidrógeno, y para el gas de plasma se utilizó Argón. La fuente empleada fue una TBA Plasma Arco 100. La soldadura fue mecanizada mediante un sistema ESAB Miggytrac 1001. En la Figura 1 se observa la fuente empleada y el montaje de los dispositivos para la soldadura.

De las probetas soldadas se extrajeron muestras para caracterización macro y microestructural. Sobre cortes metalográficos se realizaron exámenes macroscópicos de todas las uniones soldadas. En cuanto a la observación macroscópica, se realizó a través de una lupa estereoscópica de campo profundo, marca Jas. Se analizó la existencia de defectos en las uniones, la geometría y aspectos generales de las mismas. A su vez, mediante microscopía óptica se determinó el tamaño de las distintas zonas de la unión soldada: metal de

soldadura (MS) y zona afectada por el calor (ZAC) sobre la línea media del espesor de la chapa. El fin de la ZAC se definió a partir de la zona donde se alcanza la dureza del material base. Asimismo, se identificaron los microconstituyentes presentes en cada zona. A su vez, se obtuvieron perfiles de microdureza Vickers (HV0,5kg) a través de la unión soldada, determinándose además la dureza media de cada zona.

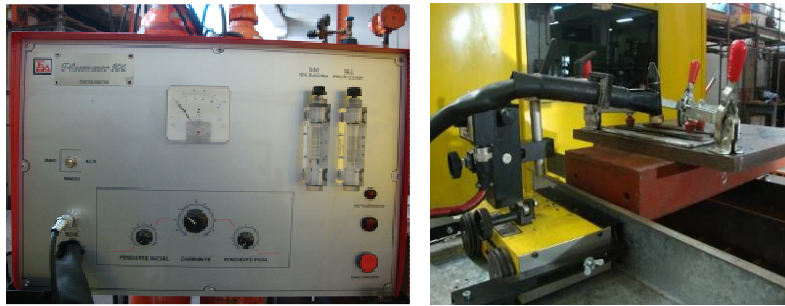


Figura 1. Montaje de los equipos y dispositivos para la soldadura.

Se realizaron ensayos de tracción transversales a la junta, determinándose la carga de rotura e identificándose la zona donde se produce la misma. Asimismo se realizaron ensayos de embutido tipo Olsen, para cada condición, caracterizándose el modo de fractura en cada caso.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se muestran los resultados de la composición química del acero al carbono manganeso analizado, expresados en porcentaje en peso (wt%).

Tabla 2. Composición Química del acero analizado.

C %	Mn %	P %	S %	Si %	Ti %	Nb %
0,06	0,19	0,008	0,008	0,02	0,001	0,001

Se observa un bajo contenido de C y Mn, con muy bajo contenido de Si, sin ningún otro contenido de aleantes. Este material corresponde a un acero de baja resistencia con buena ductilidad. La microestructura está compuesta principalmente por granos de ferrita, con orientación en la dirección de la deformación plástica del proceso de laminado en frío, encontrándose también escasas segundas fases de cementita terciaria en borde de grano o formando carburos globulares. Las propiedades mecánicas determinadas en un ensayo de tracción del material base fueron  $\sigma_{0,2} = 256$  MPa,  $\sigma_{ut} = 360$  MPa y  $A = 25\%$ . Estos valores son consistentes con la composición química mostrada y con la microestructura observada. La microdureza Vickers, determinada como el promedio de cinco mediciones, fue de 110 HV, consistentemente con los resultados obtenidos anteriormente.

En la Figura 2 se puede ver el aspecto de algunas de las uniones soldadas bajo diferentes condiciones de soldadura.

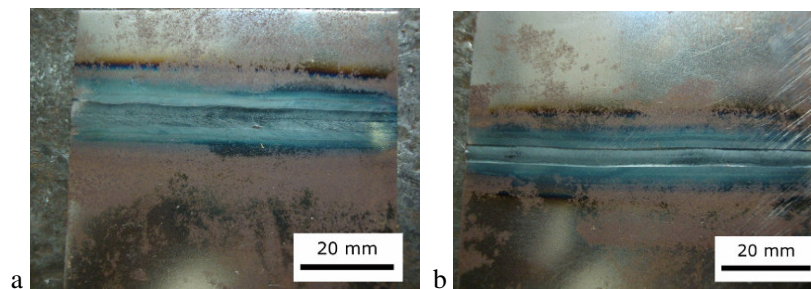
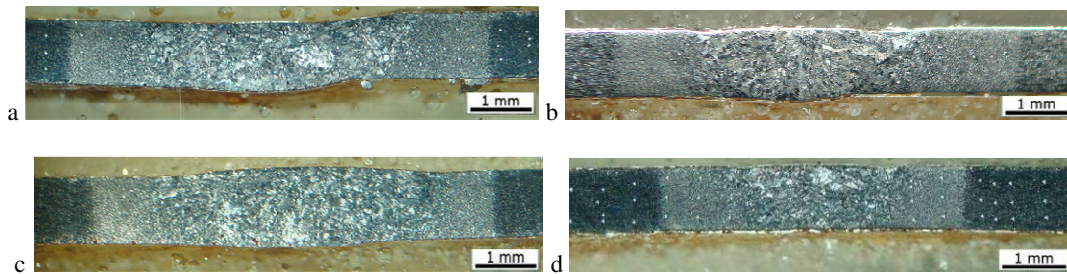


Figura 2. Probetas soldadas: a- 7 y b-11.

En todos los casos la soldabilidad fue muy buena sin presentar defectos de soldadura, con un aspecto superficial destacable. Puede verse el efecto de la velocidad de soldadura empleada sobre el ancho del

cordón obtenido. La velocidad de soldadura ( $v_s$ ) influye inversamente en el aporte térmico (HI) que se introduce al material durante la soldadura [3]. En este sentido al aumentar la  $v_s$  el HI disminuye, por lo que el volumen de material fundido disminuye, generando un cordón más pequeño. Desde el punto de vista operativo el aumento en la  $v_s$  si bien favorece la productividad, puede generar defectos como perforación, asociado a la inestabilización de la pileta [2]. Por otro lado un exceso de  $v_s$  puede traducirse en falta de penetración en la junta. Las velocidades analizadas en el presente trabajo corresponden al rango en el que se pudo obtener una junta libre de defectos, manteniendo los demás parámetros constantes. A menor velocidad que 6,7 mm/seg se produce la perforación de la chapa y a mayor velocidad que 13,3 mm/seg no se obtiene penetración completa de la junta. Cabe destacar que pudieron obtenerse juntas libres de defectos en un rango amplio de velocidades. En la Figura 3 se pueden ver macrografías de las uniones soldadas obtenidas.



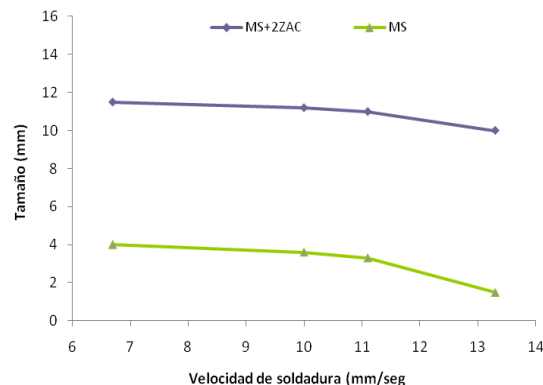
**Figura 3.** Macrografías de las uniones soldadas: a- Probeta 7, b- Probeta 10, c- Probeta 11 y d- Probeta 13.

Se puede ver la ausencia de defectos en las uniones soldadas, con una buena fusión en la raíz. Asimismo se observa el efecto de la  $v_s$  sobre el tamaño del cordón y de la ZAC. Como se mencionó anteriormente el tamaño de la zona fundida (MS) disminuye con la  $v_s$  así como el tamaño de la ZAC. El ciclo térmico sufrido por el material es menor y por lo tanto las temperaturas alcanzadas en un dado punto del material. En la Tabla 3 se muestran las dimensiones relevadas del MS y de la ZAC de cada una de las probetas soldadas.

**Tabla 3.** Dimensiones de la ZAC y del MS en las distintas probetas soldadas.

Probeta	MS + 2ZAC (mm)	MS (mm)
7	11,5	4
10	11,2	3,6
11	11	3,3
13	10	1,5

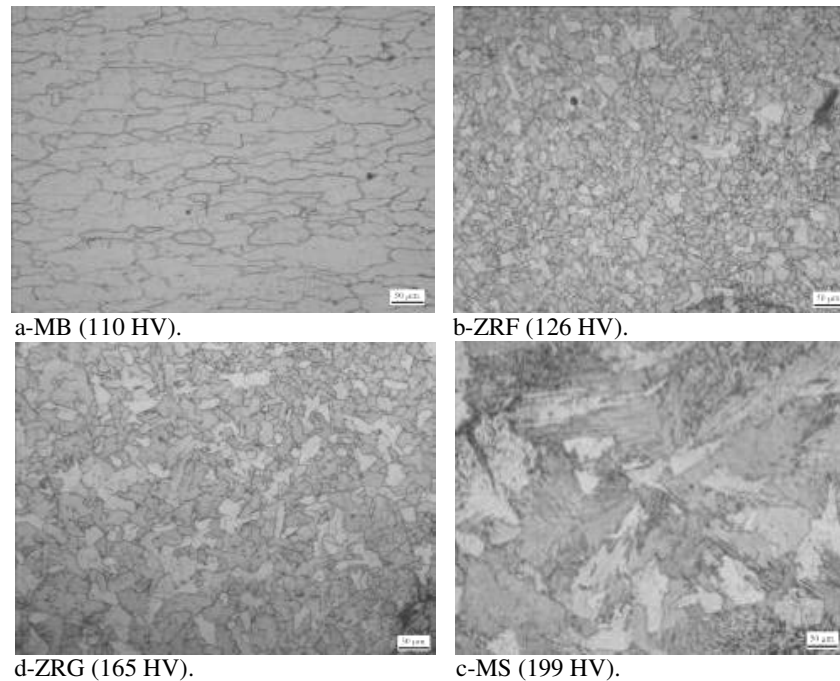
El tamaño del MS disminuye monótonamente al aumentarla ( $v_s$ ), como se observó en las macrografías. Asimismo el tamaño total de la junta soldada (MS+2ZAC) también lo hace, aunque en una menor medida. En cuanto a la ZAC en su conjunto no se ve sensiblemente afectada. Sin embargo pudo detectarse que las zonas recristalizadas, gruesa y fina, también disminuyeron su tamaño con la velocidad de soldadura. En la Figura 4 se observa la variación del tamaño de las distintas zonas de la junta soldada en función de la velocidad de soldadura.



**Figura 4.** Variación del tamaño de las distintas zonas de la junta en función de la velocidad de soldadura.

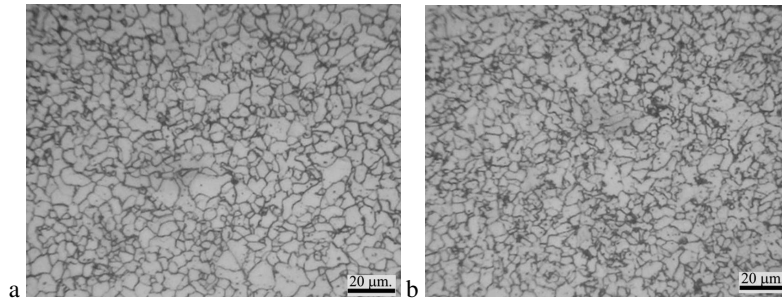
Para la longitud del MS se obtuvo una variación del 166% desde 1,5 mm (probeta 13) hasta 4 mm (probeta 7). Esto pone de manifiesto la influencia de este parámetro sobre el tamaño del cordón de soldadura. Asimismo estos tamaños son en general, menores que los que pueden obtenerse mediante otros procesos de soldadura por arco eléctrico [4]. A su vez, el tamaño de todo el material afectado por la soldadura se puede reducir hasta 10 mm, siendo esta una de las características propias de los procesos de alta densidad de energía [5].

En la Figura 5 se observan imágenes de microscopía óptica de las distintas zonas del cordón, correspondientes a la probeta 7.



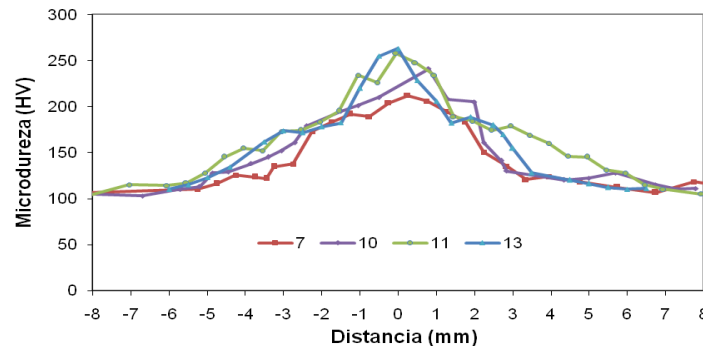
**Figura 5.** Evolución microestructural correspondiente a la Probeta 7: a- metal base (MB), b- zona recrystalizada de grano fino (ZRF), c- zona recrystalizada de grano grueso (ZRG) y d- metal de soldadura (MS).

Pueden verse las características microestructurales de las distintas zonas de la unión soldada, las cuales son representativas de lo ocurrido en las distintas probetas soldadas. En el material base se observa una estructura ferrítica que presenta cierta orientación preferencial en el sentido longitudinal, asociada a la deformación en frío aplicada a la chapa. En la zona recrystalizada de grano fino (ZRF) se observa un refinamiento del grano ferrítico asociado a la recrystalización del material que conlleva a un leve endurecimiento por afinamiento del tamaño de grano. En la zona recrystalizada de grano grueso (ZRG) se observan granos equiaxiales de mayor tamaño, con la presencia de fases ferríticas de menor temperatura de transformación. Este hecho trae asociado un endurecimiento debido a la presencia de dichas fases del tipo ferrita con segundas fases y ferrita acicular, obtenidas debido a la mayor velocidad de enfriamiento en dicha zona y al mayor tamaño de grano austenítico desde el cual se formaron, en conjunto con ferrita poligonal. En el metal de soldadura (MS) pueden verse los granos columnares típicos de una estructura de solidificación direccional. La mayor velocidad de enfriamiento y tamaño de grano producen la formación de fases ferríticas de alta dureza como las mencionadas anteriormente. Esta evolución microestructural se observó en las diferentes probetas soldadas. En particular pudo observarse que al aumentar la velocidad de soldadura, consistentemente con la disminución de los tamaños de la ZAC y del MS, se observó un mayor refinamiento de grano en la ZRF y la formación de mayor fracción de fases ferríticas de alta dureza en la ZRG y MS, debido al menor tiempo a alta temperatura y al aumento de la velocidad de enfriamiento. En la Figura 6 se pueden observar imágenes comparativas de la ZRF correspondientes a las probetas 7 y 11. Como se observa el tamaño de grano ferrítico en la ZRF de la probeta 11 ( $3,8\mu\text{m}$ ) es inferior al observado en la probeta 7 ( $5,1\mu\text{m}$ ), correspondiente a un menor ciclo térmico sufrido para la primera probeta mencionada. Esta variación microestructural tiene asociadas variaciones en la microdureza a lo largo del cordón de soldadura, siendo las propiedades locales las que definen la resistencia de la unión.



**Figura 6.** Microestructura de la ZRF de las probetas: a-7 y b-11.

En la Figura 7 se observan los perfiles de microdureza Vickers realizados sobre las uniones soldadas que ponen de manifiesto dicha evolución microestructural.



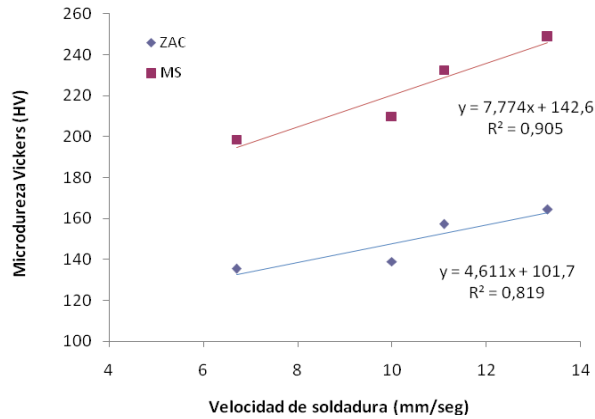
**Figura 7.** Perfiles de microdureza Vickers para las distintas probetas soldadas.

Como puede verse, se observa que para todas las probetas, la junta soldada presenta una mayor dureza que el material base, aumentando monótonamente desde aquel hasta el centro del cordón. Asimismo, puede verse que la dureza máxima en el metal de soldadura aumentó con la velocidad de soldadura. A partir de estos perfiles de dureza y de la identificación de las zonas correspondiente a cada medición, se obtuvieron los valores de dureza promedio para cada una de las zonas de la unión soldada, para cada probeta. En la Tabla 4 se muestran dichos valores promedio obtenidos. En el caso de la dureza promedio de la ZAC involucra a las zonas ZIC, ZRF y ZRG.

**Tabla 4.** Valores de dureza promedio para las distintas zonas de la junta, en cada probeta soldada.

Probeta	HV <sub>ZIC</sub>	HV <sub>ZRF</sub>	HV <sub>ZRG</sub>	HV <sub>ZAC</sub>	HV <sub>MS</sub>
7	116	126	165	135	199
10	126	146	167	139	210
11	143	175	185	157	232
13	148	182	203	164	249

La dureza promedio de cada zona aumentó con la velocidad de soldadura, consistentemente con lo observado en las microestructuras de cada probeta. Este aumento de dureza está relacionado con los mecanismos de endurecimiento por afinamiento del tamaño de grano y por segundas fases. Desde un punto de vista tecnológico es de interés contar con expresiones que permitan estimar la dureza resultante en función de la velocidad de soldadura empleada. En la Figura 8 se grafica la dureza promedio de la ZAC y del MS en función de la velocidad de soldadura. Se obtuvieron las expresiones empíricas que se muestran en la Figura 8 que muestran una buena correlación ( $R^2 > 0,8$ ), a partir de las cuales se puede estimar la dureza resultante de las mencionadas zonas. Como puede verse la dureza en el MS es más sensible que la de la ZAC, debido a las mayores velocidades de enfriamiento en dicha zona. En cuanto a la resistencia a la tracción de la junta soldada, en todos los casos estuvo controlada por la resistencia del material base. La fractura se produjo en todos los casos en el material base dado que esta es la zona de menor resistencia, de acuerdo a lo observado en los perfiles de microdureza.



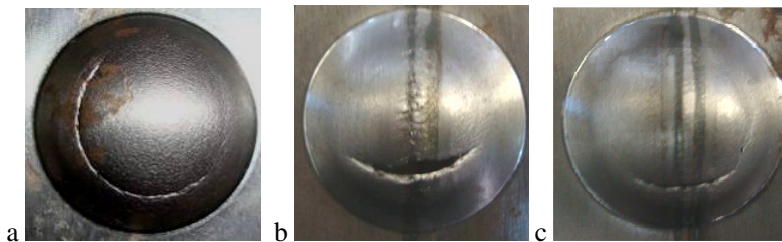
**Figura 8.** Variación de la dureza en función de la velocidad de soldadura. MS

En relación a la conformabilidad, en la Tabla 5 se pueden ver los resultados obtenidos del ensayo de embutido Olsen.

**Tabla 5.** Resultados del ensayo de embutido Olsen.

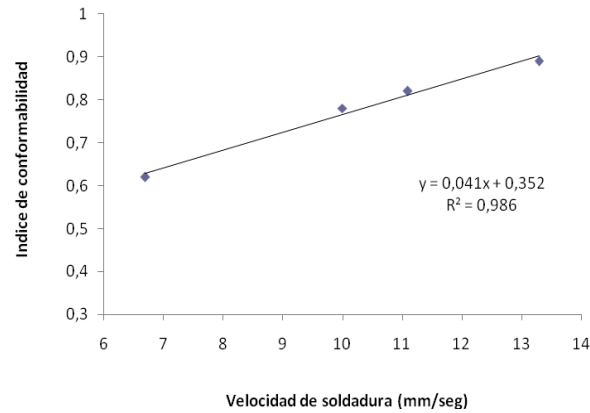
Muestra	P max (N)	h max (mm)	Ic
MB	19700	10,6	-
7	13100	6,58	0,62
10	17200	8,23	0,78
11	18600	8,67	0,82
13	19700	9,41	0,89

Se observa que la conformabilidad de las uniones soldadas es inferior a la del material base, como sucede habitualmente [5]. En este sentido, el índice de embutibilidad Ic muestra la disminución específica de la altura de la copa en la unión soldada respecto a la determinada en el material base [5], encontrándose en este caso entre 62 y 89% del valor del material base. En la Figura 9 se observan algunas de las probetas luego del ensayo de embutido: metal base, probeta 7 y probeta 11.



**Figura 9.** Copas del ensayo de embutido Olsen: a- MB, b- probeta 7 y c- probeta 11.

Puede verse que en el material base la fractura se produce sobre una circunferencia sobre la que tiene lugar la inestabilización plástica o estricción, previa a la rotura. A medida que disminuye la conformabilidad el radio de dicha circunferencia disminuye, como puede observarse para la probeta 11 y la probeta 7. Asimismo en todos los casos la fractura se produjo en forma transversal al cordón de soldadura. En el caso de la probeta 11 se puede ver una mayor integridad del cordón que en la probeta 7, donde se ve agrietamiento en el cordón. A medida que aumenta la velocidad de soldadura se obtuvo un aumento en la conformabilidad de las probetas soldadas, como se observa en la Figura 10. Estos resultados (Ic=0,89) son superiores a los que habitualmente se obtienen para uniones soldadas mediante otros procesos de soldadura por arco eléctrico [4] e inclusive por laser (LW) [5]. Asimismo el aumento de la velocidad de soldadura produce una mayor velocidad de enfriamiento y por ende una microestructura de mayor dureza, la cual a su vez presenta una mejor conformabilidad. Es usual que un aumento en la resistencia tenga asociada una disminución de la conformabilidad [5].



**Figura 10.** Índice de embutido en función de la velocidad de soldadura.

Sin embargo en este caso no se observa dicho comportamiento. Este comportamiento estaría asociado al mayor refinamiento producido en la ZRF y en el ancho del grano columnar, así como a la presencia de segundas fases ferríticas de mayor resistencia pero con buena ductilidad como la ferrita acicular.

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analizó el efecto de la velocidad de soldadura en el proceso PAW en acero al C-Mn, en chapa fina de 1 mm de espesor. Se determinó el rango de velocidades de soldadura para el cual se obtienen uniones libres de defectos en 6-13 mm/seg., para el conjunto de parámetros utilizados. En todos los casos se obtuvo una muy buena soldabilidad con un excelente aspecto superficial del cordón.

La variación de la velocidad de soldadura produce modificaciones microestructurales asociadas a su influencia en el calor aportado y el ciclo térmico sufrido por el material. El tamaño del MS se redujo aproximadamente en un 400% y el de la ZAC se redujo aproximadamente en un 50% al aumentar la  $v_s$  en el rango estudiado. Al aumentar la  $v_s$  se observó un aumento en la dureza del material, debido a la disminución del tamaño de grano y a la formación de fases ferríticas de mayor dureza, por el aumento en la velocidad de enfriamiento y el menor tiempo a alta temperatura.

Los mejores resultados se obtuvieron para la mayor velocidad de soldadura (13mm/seg) obteniéndose un índice de embutido cercano al 90%, siendo la resistencia a la tracción de la junta la del material base, debido a la mayor dureza de la ZAC y del MS.

Se mostró que el proceso de soldadura PAW presenta propiedades mecánicas en la junta soldada superiores a las obtenidas mediante otros procesos de soldadura por arco eléctrico, con mayores velocidades de soldadura y sin la necesidad de utilizar consumibles, para la soldadura de estos aceros en chapa fina.

#### 5. REFERENCIAS

1. Welding Handbook, v. 2, 7th Ed., Miami, FL, American Welding Society, 1978.
2. R. P. Reis, A. Scotti, Fundamentos y práctica da soldagem a plasma, San Pablo, Artliber, 2007, 147 p.
3. S. Kou, Welding Metallurgy, 2<sup>nd</sup> Edition, New Jersey, John Wiley & Sons, 2003, 465 p.
4. H. G. Svoboda, M. N. Ramini de Rissone, E. S. Surian y L. A. de Vedia, "Welding of fine-grained steels for automotive applications"; New Developments on Metallurgy and Applications of High Strength Steels International Conference, 2008, p. 69-84.
5. "Advanced high strength steel (AHSS) application guidelines"; International Iron & Steel Institute, Committee on Automotive Applications, 2005, 113 p.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo desean agradecer a Ternium-Siderar por la donación del material base, así como a la Universidad de Buenos Aires por el financiamiento a través del proyecto UBACyT 2010-12 N° I601. Asimismo agradecen al personal del Laboratorio de Materiales y Estructuras y del Laboratorio de Materiales, ambos de la FIUBA por su colaboración.