

Efecto de los parámetros de soldadura en mallas de acero electrosoldadas

Effect of welding parameters on welded steel wire mesh

María José Castillo^{1,2}, Valeria Luján de la Concepción María³, César David Marconi¹, Hernán Gabriel Svoboda^{4,5}

¹ DEYTEMA, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Nicolás, San Nicolás, Buenos Aires, Argentina.

² Escuela de Tecnología, Universidad Nacional del Noroeste de Buenos Aires, Junín, Buenos Aires, Argentina.

e-mail: mariajose.castillo@nexo.unnoba.edu.ar

³ Laboratorio de Soldadura, Centro de Mecánica – Instituto Nacional de Tecnología Industrial - INTI, San Martín, Buenos Aires, Argentina.

⁴ GTSyCM3 – INTECIN, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

⁵ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – CONICET, Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

e-mail: cmarconi@frsn.utn.edu.ar; valeriac@inti.gob.ar; hsvobod@fi.uba.ar

RESUMEN

El hormigón armado es el material utilizado por excelencia en la industria de la construcción. El refuerzo del hormigón es en general barras de acero nervuradas. En ciertas aplicaciones, resulta conveniente el empleo de mallas y son empleadas en la mayoría de las estructuras de hormigón armado (edificios, carreteras, túneles y componentes prefabricados). Estas mallas de acero son en general electrosoldadas (PW: Projection Welding), donde el calor generado para producir la unión surge de la resistencia que oponen las piezas de trabajo al paso de la corriente eléctrica, bajo la acción de presión mecánica. Dicho proceso presenta diversos parámetros operativos los cuales afectan la calidad de las uniones soldadas y la evolución microestructural que tiene lugar durante la soldadura. La norma IRAM-IAS U 500-06 establece los requerimientos que deben cumplir dichas mallas electrosoldadas. El objetivo de este trabajo es estudiar la influencia de los parámetros de proceso sobre la evolución microestructural y las propiedades mecánicas de las uniones de mallas electrosoldadas. Para esto se soldaron alambres nervurados ATR 500M de 4 mm de diámetro mediante PW con diferentes parámetros de soldadura. Se evaluó la influencia de la corriente de soldadura, el tiempo de soldadura, la fuerza y el tiempo de presoldadura. Sobre las uniones soldadas, se caracterizó la macro y microestructura, se realizaron perfiles de microdureza y ensayos de arrancamiento. Se realizaron comparaciones con mallas comerciales y se verificó el cumplimiento de los requisitos de la mencionada norma. Se observó un fuerte efecto del tiempo y la corriente de soldadura y se obtuvo un procedimiento optimizado.

Palabras clave: malla electrosoldada, parámetros de soldadura, propiedades mecánicas, macroestructura

ABSTRACT

Reinforced concrete is the most widely used material in construction industry. Generally concrete is reinforced with ribbed bars. In certain applications, it is desirable to use welded mesh and are used in most reinforced concrete structures (buildings, roads, tunnels and prefabricated components). Welded mesh are generally electrowelded (PW: Projection Welding), where the heat necessary to produce the joint is originated by the resistance that oppose the workpieces to the flow of electric current, under the action of mechanical pressure. This process presents various operational parameters which affect the quality of welded joints and the microstructural evolution that takes place during welding. IRAM-IAS U 500-06 standard establishes the requirements to be met by welded steel mesh. The aim of this work is to study the influence of process parameters on the microstructural evolution and mechanical properties of the joints of welded mesh. ATR 500 M ribbed wires of 4 mm in diameter were welded by PW with different welding parameters. The influence of the welding current, welding time, pressure and prewelded time were evaluated. On welded joints, it was characterized the macro and microstructure, microhardness profiles and pull tests were performed. Comparisons with commercial mesh were made and compliance with the requirements of that standard is verified. A strong

effect of time and welding current is observed and optimized procedure was obtained.

Keywords: welded Mesh, welding parameters, mechanical properties, macrostructure

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material compuesto que, una vez endurecido, se asemeja a una piedra artificial. En general, todos los hormigones y, especialmente los convencionales, están formados por áridos, cemento y agua. Además de los componentes principales, hay otros componentes secundarios como, por ejemplo, aditivos, fibras, cargas, armaduras metálicas. En el hormigón armado, la armadura constituye uno de los componentes fundamentales [1].

Diversos tipos de aceros pueden utilizarse como refuerzo en estructuras de hormigón armado. En nuestro país, las barras ADN 420 y ADN 420S, son frecuentemente utilizadas por sus características mecánicas y buena soldabilidad (para el caso de las ADN 420S). Para la fabricación de mallas o estructuras tipo TRILOGIC, se utilizan productos especificados por la norma IRAM-IAS U500-26 [2]. Estas mallas de acero son en general electrosoldadas a través de procesos de soldadura por resistencia (RW: Resistance Welding), en este caso, el calor generado para producir la unión surge de la resistencia que oponen las piezas de trabajo al paso de la corriente eléctrica, bajo la acción de presión mecánica. El calor generado se emplea para efectuar la soldadura. Una característica importante de la RW es la rapidez con que puede producirse el calor para generar la unión por soldadura. Específicamente, para la unión de barras electrosoldadas, donde el número de soldaduras a realizar al mismo tiempo es elevado, se utiliza el proceso de soldadura por proyección, (PW; Projection Welding) el cual es una variante de RW. En este caso, el flujo de corriente es concentrado en puntos de contacto entre las partes a ensamblar, a través de proyecciones o extensiones en una o ambas partes. Estas extensiones o proyecciones son utilizadas para concentrar el calor en el punto de contacto. La operación de soldadura PW implica la aplicación coordinada de corriente eléctrica y presión mecánica. La corriente debe pasar entre los electrodos atravesando el metal base. Su continuidad se asegura mediante fuerzas aplicadas a los electrodos, o por proyecciones moldeadas para proveer la densidad de corriente y presión necesarias. La secuencia de operación debe, en primer lugar, generar suficiente calor para llevar un volumen confinado del metal a la temperatura de forjado. Luego, el metal se enfría bajo presión [3]. Este proceso presenta diversos parámetros operativos los cuales afectan la calidad de las uniones soldadas y la evolución microestructural que tiene lugar durante la soldadura. Es habitual la falla de puntos de soldadura durante el montaje de mallas de acero electrosoldadas. La disponibilidad de información sistemática sobre el efecto de las variables de procesos más significativas es escasa.

El objetivo de este trabajo es estudiar la influencia de los diferentes parámetros de PW sobre la evolución microestructural y las propiedades mecánicas de las uniones de mallas electrosoldadas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Material base

Para la ejecución de este trabajo se utilizaron barras ATR 500N comerciales, según norma IRAM-IAS U500-26 [2], de 4 mm de diámetro y 100 mm de longitud, como material base para las juntas soldadas. Se evaluó la composición química de dicho material mediante espectrometría de emisión óptica (OES). Se caracterizó la microestructura mediante microscopía óptica y se determinó la microdureza Vickers (Hv) según ASTM E 384 [4].

2.2 Realización de uniones soldadas

Sobre varias muestras de material base se efectuaron uniones soldadas mediante el proceso de soldadura por proyección (PW), utilizando electrodos planos de cobre. El equipo empleado se muestra en la Figura 1. Para realizar cada una de las uniones se dispusieron dos barras en forma transversal como se muestra en la Figura 2.



Figura 1: Equipo utilizado para la realización de las uniones soldadas.

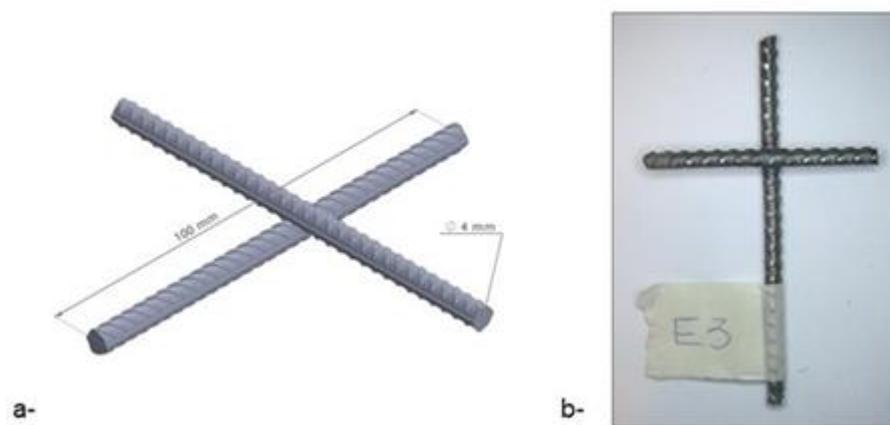


Figura 2: a- Disposición de las barras para la ejecución de la junta, b- Unión soldada finalizada.

En cada unión soldada se varió el número de ciclos de soldadura (4, 6, 8 y 10 ciclos), la fuerza de soldadura (desde 750 a 2500 N) y se utilizaron tres niveles de corriente promedio (4,5; 5,5 y 6,5 kA). El tiempo de pre-soldadura fue de 50 ciclos y el de post-soldadura fue de 10 ciclos. Los parámetros de soldadura empleados se indican en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de soldadura empleados.

CÓDIGO	TIEMPO DE SOLDADURA (CICLOS)	PRESIÓN (BAR)	FUERZA (N)	CORRIENTE (kA)
A4	4	2,5	750	4,5
A6	6	2,5	750	4,5
A8	8	2,5	750	4,5
A10	10	2,5	750	4,5
B4	4	2,5	750	5,5
B6	6	2,5	750	5,5
B8	8	2,5	750	5,5
B10	10	2,5	750	5,5

C4	4	3,5	1000	4,5
C6	6	3,5	1000	4,5
C8	8	3,5	1000	4,5
C10	10	3,5	1000	4,5
D4	4	3,5	1000	5,5
D6	6	3,5	1000	5,5
D8	8	3,5	1000	5,5
D10	10	3,5	1000	5,5
E4	4	4,5	1350	4,5
E6	6	4,5	1350	4,5
E8	8	4,5	1350	4,5
E10	10	4,5	1350	4,5
F4	4	4,5	1350	5,5
F6	6	4,5	1350	5,5
F8	8	4,5	1350	5,5
F10	10	4,5	1350	5,5
G4	4	6,5	2000	4,5
G6	6	6,5	2000	4,5
G8	8	6,5	2000	4,5
G10	10	6,5	2000	4,5
H4	4	6,5	2000	5,5
H6	6	6,5	2000	5,5
H8	8	6,5	2000	5,5
H10	10	6,5	2000	5,5
I4	4	8,5	2500	4,5
I6	6	8,5	2500	4,5
I8	8	8,5	2500	4,5
I10	10	8,5	2500	4,5
J4	4	8,5	2500	5,5
J6	6	8,5	2500	5,5
J8	8	8,5	2500	5,5
J10	10	8,5	2500	5,5
K4	4	6,5	2000	6,5
K6	6	6,5	2000	6,5

2.3 Caracterización de las uniones soldadas

Sobre cada una de las uniones soldadas y sobre muestras de origen comercial, fabricadas a partir del producto ATR 500N [2], se realizó una caracterización macro y microestructural sobre cortes transversales, a la mitad del diámetro de una de las varillas soldadas. Todas las muestras se desbastaron con papeles abrasivos de carburo de silicio hasta grado 600, el pulido final se realizó utilizando pasta diamantada de 6 y 1 μm . La microestructura de soldadura se reveló con Nital 2 % y se evaluó por microscopía óptica (MO). Se realizaron barridos de microdureza Vickers con 300 gf de carga a través del diámetro de una de las varillas soldadas. Las improntas fueron realizadas cada 0,25 mm [4].

Se efectuaron ensayos de resistencia al corte según norma IRAM-IAS U500-06 [5]. Se analizaron las superficies de fractura de cada muestra mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).

3. RESULTADOS

3.1 Material base

En la Tabla 2 se muestra la composición química del material base, así como también el Carbono Equivalente (Ceq IIW) calculado [6].

Tabla 2: Composición química del producto ATR 500 N Comercial (% en peso).

C	Mn	Si	P	S	Ceq (IIW)
0,10	0,43	0,08	0,009	0,011	0,171

Como puede verse el material corresponde a un acero de bajo carbono con 0,45 % de manganeso y 0,1 % de Si. Por otra parte el carbono equivalente es bajo por lo que no presenta problemas de soldabilidad. En la Figura 3 se observa la microestructura del material base, formada por granos orientados de ferrita y perlita. Dicha microestructura corresponde a un acero de bajo carbono sometido a una deformación en frío. Asimismo, se observa un tamaño de grano fino (aproximadamente 10 micrones).

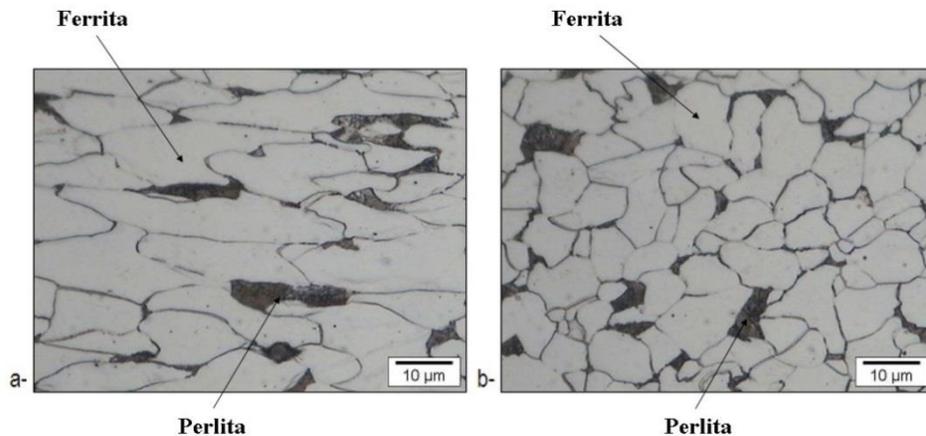


Figura 3: Microestructura del material base, correspondiente al producto ATR 500N; a- Corte longitudinal, b- Corte transversal.

La microdureza Vickers promedio obtenida para el metal base resultó de 211 HV para el corte transversal y de 210 HV para el longitudinal. Estos valores de dureza se alcanzan por el fuerte endurecimiento por deformación en frío al que fue sometido el material.

3.2 Macroestructura de las uniones soldadas

La Figura 4 muestra macrografías de algunas de las probetas soldadas. En este caso se quiso mostrar los diferentes niveles de calidad obtenidos a medida que aumenta el tiempo de soldadura, la fuerza y la corriente de soldadura.

Para la figura 4a puede verse una configuración de bajo tiempo de soldadura (4 ciclos) y baja corriente (4,5 kA) con fuerza intermedia (1350 N), para la cual la indentación del alambre superior respecto del inferior es baja, sin observarse flujo plástico significativo entre ambos alambres y una zona de unión pequeña. Asimismo, para la figura 4d, se observa una unión realizada con un alto tiempo de soldadura (10 ciclos) y corriente y fuerza intermedias (1000 N y 5,5 kA). Puede verse una indentación excesiva, con una zona afectada térmicamente significativamente más grande que en los casos anteriores. Para la condición B8 (Figura 4c) se observa un buen balance entre ambas condiciones extremas, mencionadas anteriormente.

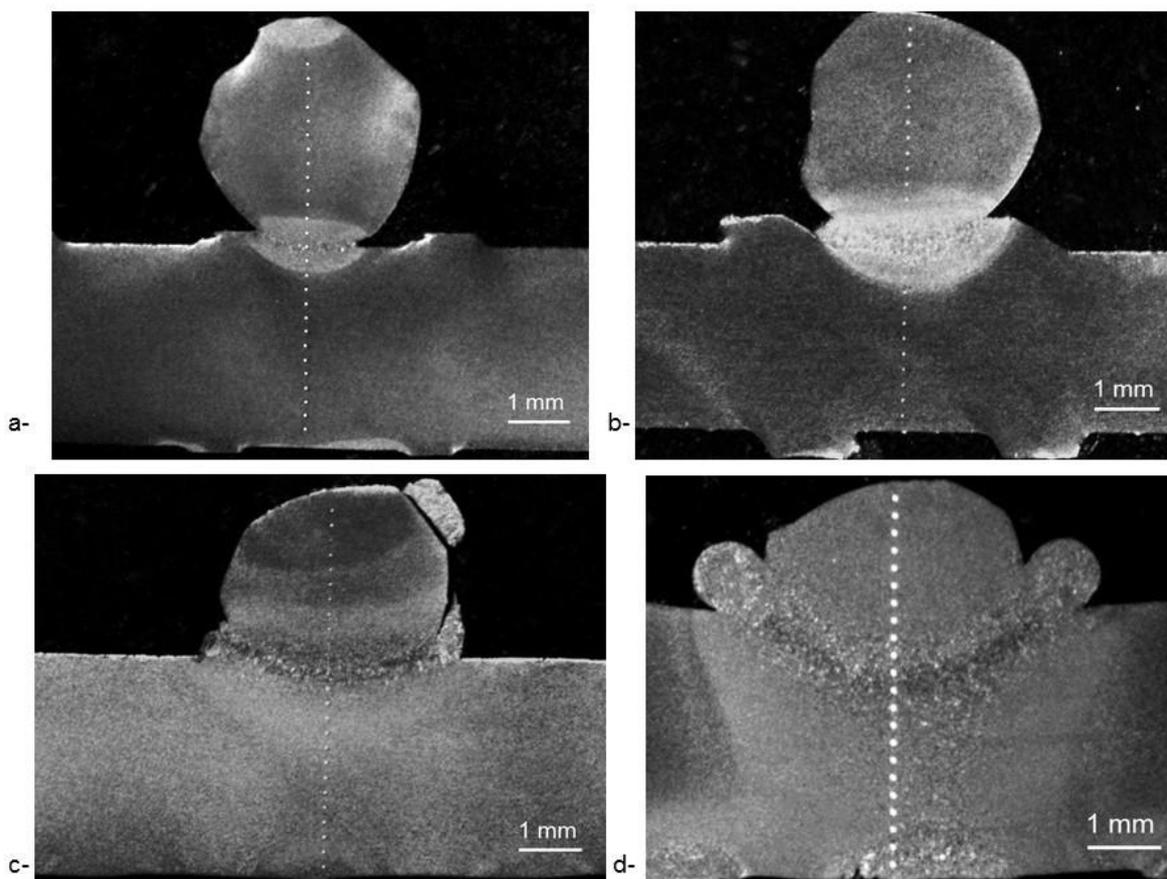


Figura 4: Macrográficas correspondientes a las probetas: a- E4, b- A6, c- B8, d- D10.

3.3 Microdureza

En la Tabla 3 se muestran los valores de microdureza promedio, máximo y mínimo para cada una de las juntas soldadas. El valor promedio corresponde al obtenido a partir de todas las mediciones realizadas para cada uno de los perfiles ejecutados.

Tabla 3: Valores de microdureza promedio, máximo y mínimo para cada una de las juntas soldadas.

CÓDIGO	HV MÍNIMO	HV MÁXIMO	HV PROMEDIO	CÓDIGO	HV MÍNIMO	HV MÁXIMO	HV PROMEDIO
A4	195	359	251	F6	159	332	209
A6	196	368	253	F8	138	226	174
A8	151	213	197	F10	151	178	169
A10	140	233	173	G4	259	365	280
B4	245	364	275	G6	181	357	258
B6	172	363	261	G8	153	253	182
B8	149	338	219	G10	144	219	169
B10	137	179	160	H4	200	373	265
C4	199	367	260	H6	167	261	207
C6	179	269	213	H8	140	241	164
C8	159	357	240	H10	156	283	192
C10	151	313	198	I4	204	376	258
D4	190	352	227	I6	168	335	226
D6	156	297	209	I8	152	234	186
D8	148	238	177	I10	148	222	172

D10	142	194	163	J4	268	364	292
E4	244	390	286	J6	146	370	253
E6	188	377	255	J8	136	308	212
E8	157	341	229	J10	234	277	243
E10	144	312	202	K4	185	331	225
F4	192	375	231	K6	153	185	165

En general puede verse que dichos valores disminuyen al aumentar el tiempo de soldadura y la corriente de soldadura, asociados a un mayor aporte térmico.

3.4 Resistencia al corte de las uniones soldadas

En la Tabla 4 se presentan los valores obtenidos para la resistencia al corte de cada unión soldada, y la zona donde se produjo: en la interfase (I), en la soldadura (S), parte en la soldadura y parte en el metal base (S-MB) o en el metal base (MB). En las Figuras 5 y 6 se muestran ejemplos de cada una de las zonas de rotura.

Tabla 4: Resistencia al corte y zona de rotura de las uniones soldadas.

CÓDIGO	RESISTENCIA AL CORTE (N)	ZONA DE ROTURA	CÓDIGO	RESISTENCIA AL CORTE (N)	ZONA DE ROTURA
A4	1857	S	F6	6330	MB
A6	3190	S	F8	6130	MB
A8	4785	S	F10	7325	S-MB
A10	5810	S-MB	G4	3880	I
B4	2359	S	G6	4600	S
B6	4555	S-MB	G8	6560	S-MB
B8	5885	S-MB	G10	6080	MB
B10	8700	MB	H4	4740	S
C4	2255	I	H6	6345	MB
C6	4080	I	H8	7030	MB
C8	4565	I	H10	8305	MB
C10	6585	S-MB	I4	3525	I
D4	4655	S	I6	5605	I
D6	5660	S	I8	5475	I
D8	6325	S-MB	I10	5895	S-MB
D10	8580	MB	J4	4555	S
E4	1775	I	J6	6090	MB
E6	4505	S	J8	8050	S-MB
E8	6430	S-MB	J10	8340	MB
E10	6415	S-MB	K4	4290	S
F4	4830	S	K6	6740	MB

En general se observa que la carga de rotura aumenta con el tiempo de soldadura, la corriente de soldadura y con la fuerza aplicada. Asimismo, se observa un cambio del modo de fractura con la carga de rotura, siendo las condiciones de mayor carga aquellas que se fracturan en el MB.

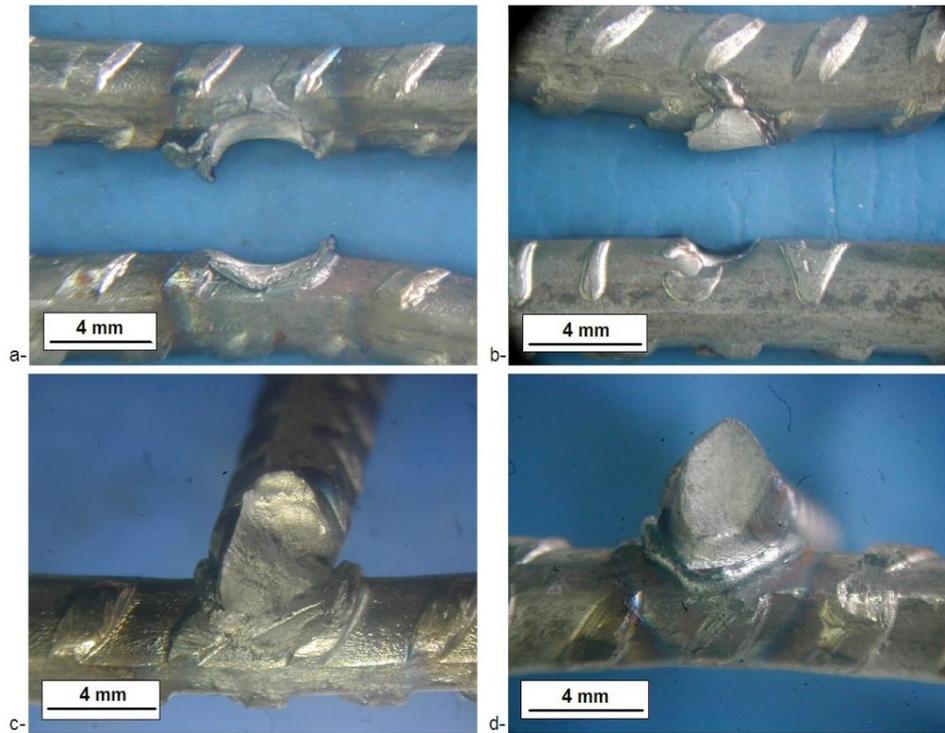


Figura 5: Zonas de rotura de las uniones soldadas, luego de ser sometidas a ensayo de resistencia al corte: a- Interfase (I8), b- Soldadura (B4), c- Soldadura-Metal Base (E10), d- Metal Base (J6).

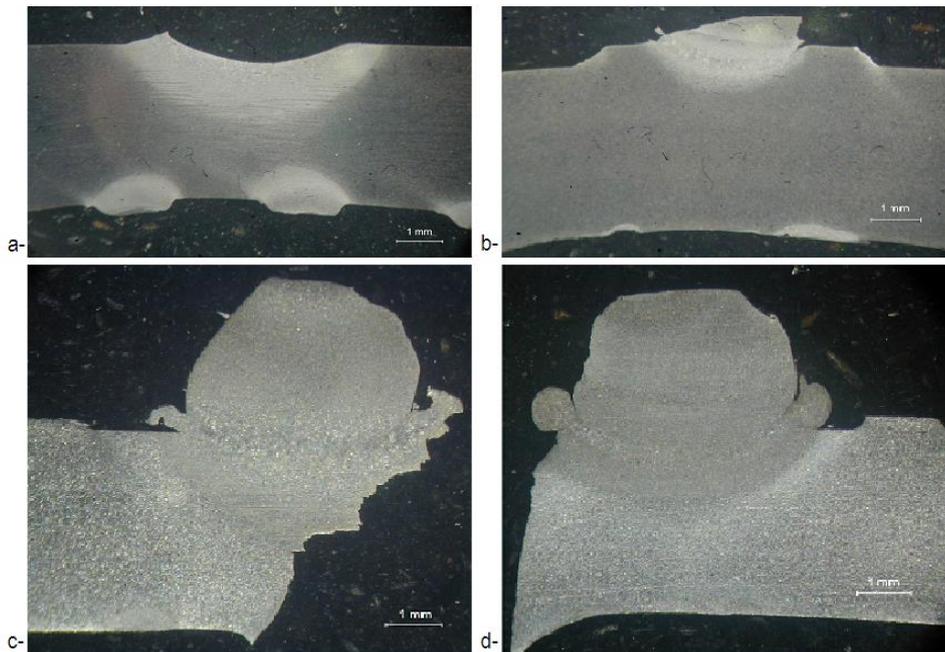


Figura 6: Macrográficas pertenecientes a las zonas de rotura de las uniones soldadas, luego de ser sometidas a ensayo de resistencia al corte: a- Interfase (I8), b- Soldadura (B4), c- Soldadura-Metal Base (E10), d- Metal Base (J6).

3.5 Superficies de fractura

La Figura 7 muestra micrográficas de las superficies de fractura de distintas probetas soldadas.

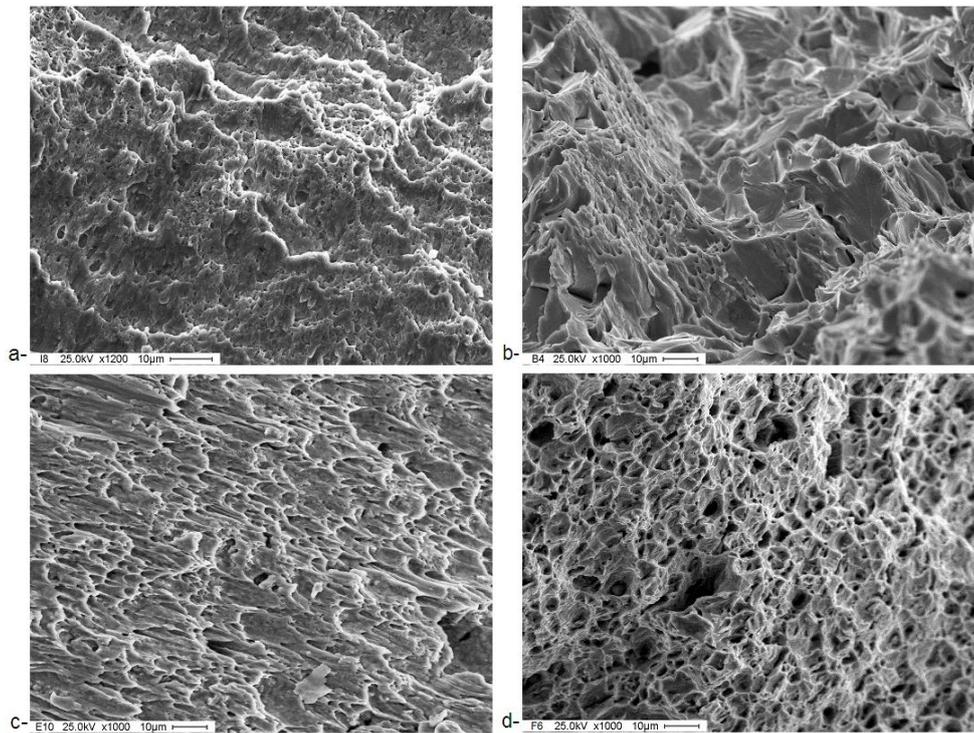


Figura 7: Imágenes SEM de las superficies de fractura de las muestras: a- I8, b- B4, c- E10, d- J6.

Puede verse que se encontraron distintas superficies de fractura asociados a los modos de fractura mencionados anteriormente. Cuando la fractura se encuentra vinculada de alguna forma con la soldadura se observa la presencia de microhuecos elongados en alguna dirección preferencial (tensiones de corte) y zonas de clivaje. Para el caso de la fractura por el MB se observa una superficie de fractura asociada a una condición de tracción dúctil.

4. DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de uniones soldadas

A partir de la inspección de las macrográficas obtenidas puede observarse que, al incrementar el tiempo de soldadura, el calor aportado aumenta, mejorando la extensión de la zona de unión. Por otro lado, dicho incremento en el tiempo, ocasiona un sobrecalentamiento, provocando un flujo excesivo de material fuera de la unión [7], tal como puede observarse en las macrográficas mostradas en la Figura 4. Por último, cuando el tiempo (u otros parámetros asociados a la generación de calor) son insuficientes, la interfase soldada resulta discontinua (Figura 8).

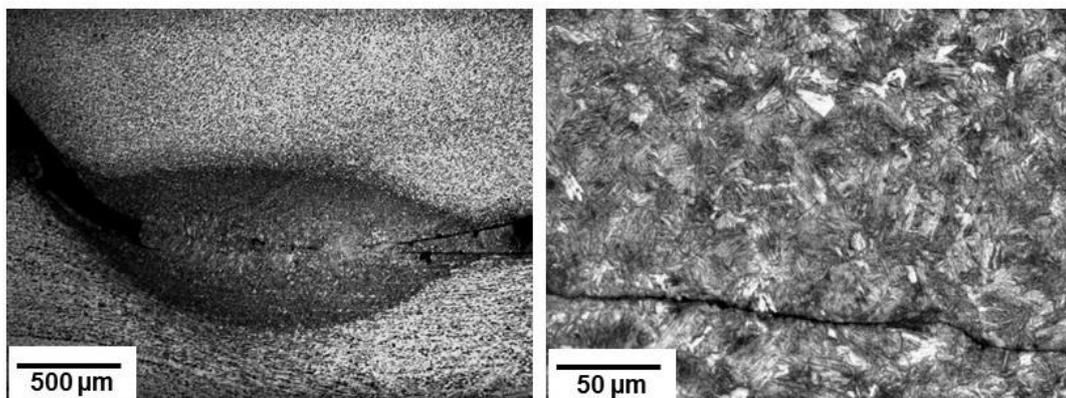
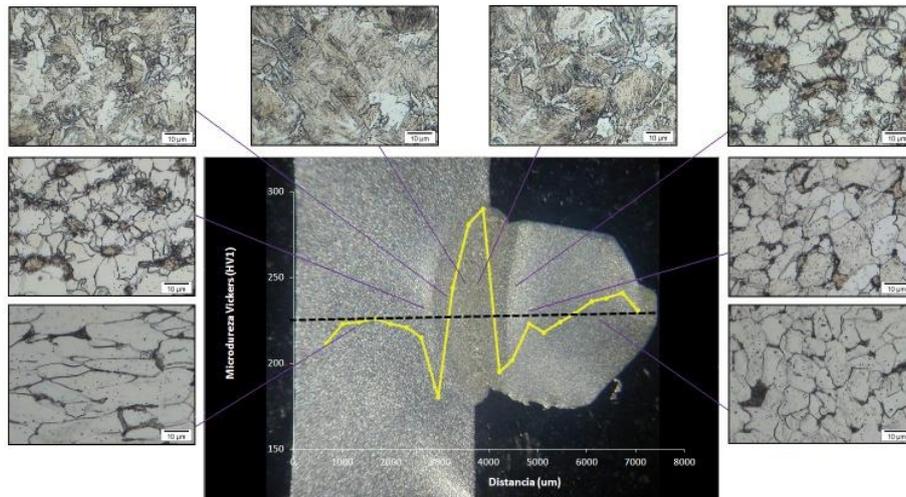


Figura 8: Micrográficas de la región soldada de las probetas B4 (4 ciclos de soldadura; 750 N de fuerza y 5,5 kA de corriente) y E4 (4 ciclos de soldadura; 1350 N de fuerza y 4,5 kA de corriente).

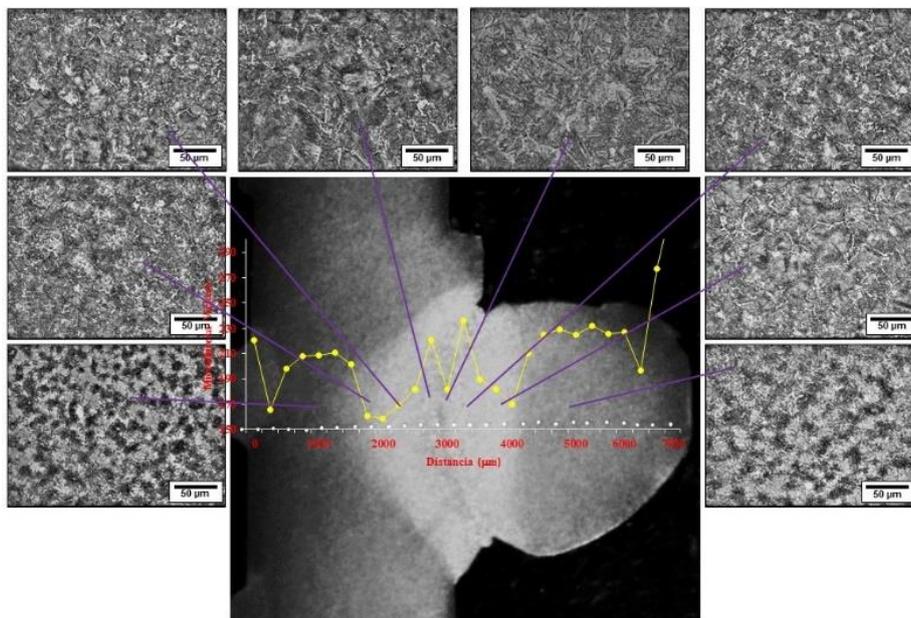
En cuanto a la evolución microestructural en la zona de la soldadura, en la Figura 9 puede verse una imagen de una de las uniones soldadas con la microestructuras observadas en función de la distancia a la línea de unión. En general se tiene que al acercarse a la línea de unión, la temperatura alcanzada aumenta lo que produce la recrystalización del material base fuertemente deformado en frío. Luego para las zonas de mayor temperatura se observa una recrystalización por austenización inicialmente parcial y luego total, y para las zonas adyacentes a la línea de unión un crecimiento de grano significativo. Asimismo, las mayores velocidades de enfriamiento en esta última zona, produce productos de la descomposición de la austenita de mayor dureza.

4.2 Microdureza

En la Figura 9 se observa el perfil de microdureza Vickers sobre un corte macrográfico y las micrográficas asociadas a las distintas zonas, para una muestra comercial (a) y para la unión soldada F6 (b).



a-



b-

Figura 9: Perfil de microdureza, macro y microestructura; a-Probeta comercial, b-Probeta -F6.

Puede verse que inicialmente la dureza disminuye desde el material base hacia la línea de unión, hasta alcanzar la dureza mínima, que se asocia a una estructura ferrítica recrystalizada, luego comienza a aumentar hasta alcanzar la dureza máxima en la zona cercana a la unión, asociada a la presencia de fases de menor

temperatura de transformación, como se mencionó anteriormente. Para ambos casos mostrados, los perfiles de microdureza fueron semejantes en forma y valores.

La Figura 10 muestra el gráfico con el valor mínimo, máximo y promedio de microdureza obtenidos para la “Serie D” de probetas soldadas (1000 N de fuerza y 5,5 kA de corriente) con el tiempo de soldadura. Puede observarse un descenso de dichos valores al incrementarse el tiempo de soldadura, consecuencia del mayor calor generado [7] y de la formación de mayor fracción de fases blandas (Figura 9) asociadas a la menor velocidad de enfriamiento [8]. Este comportamiento se observó en la mayoría de las series soldadas. A su vez se observa el mismo comportamiento para los tres valores de dureza reportados.

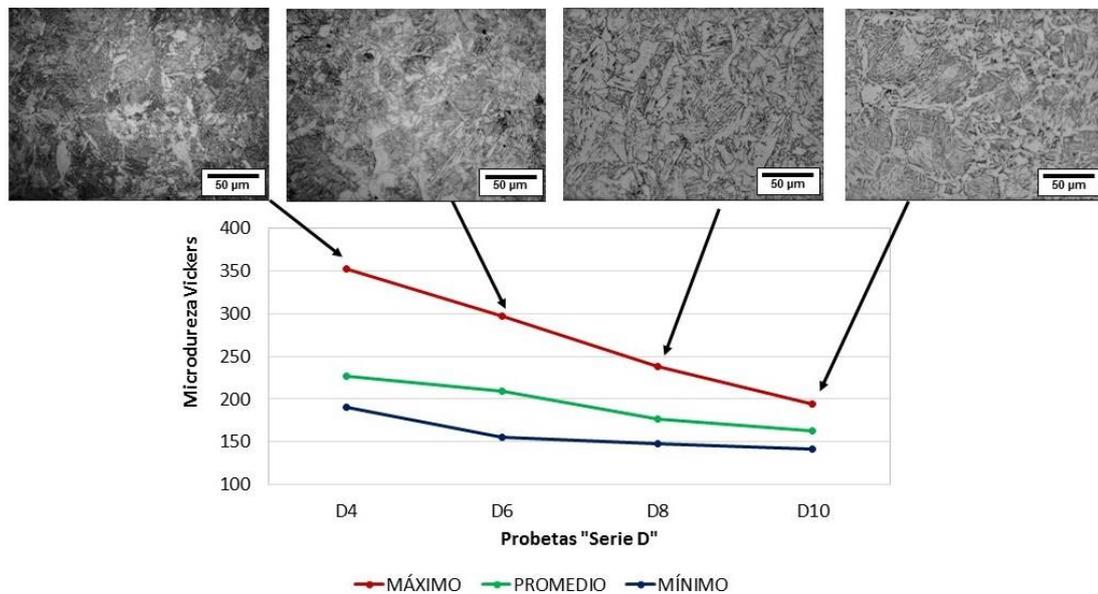


Figura 10: Valor mínimo y promedio de microdureza para la “Serie D” de probetas soldadas. Micrografías de la interfase soldada para la serie analizada (valor de microdureza máximo).

La Figura 11 muestra los resultados de microdureza obtenidos (mínimo, máximo y promedio) para probetas soldadas con valores crecientes de corriente promedio. Se observa una disminución de ambos valores al incrementarse la corriente promedio utilizada. Al pasar de 4,5 a 6,5 kA de corriente promedio el valor de microdureza mínimo varía desde 181 a 153 HV, lo que significa un 15 % de ablandamiento. Esto estaría asociado a la menor velocidad de enfriamiento vinculada al mayor aporte térmico [8] lo que produce la formación de mayor fracción de fases ferríticas blandas, como se observa en la Figura 11.

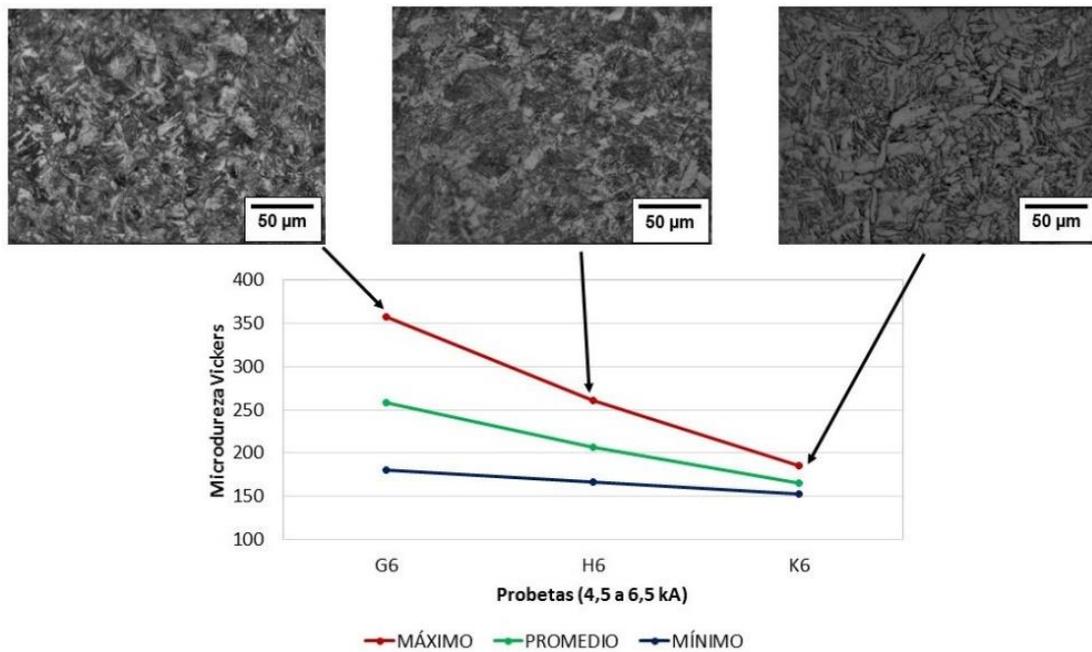


Figura 11: Valor mínimo, máximo y promedio de microdureza para probetas soldadas con distintas corrientes (G6: 6 ciclos; 2000 N de fuerza y 4,5 kA de corriente – H6: 6 ciclos; 2000 N de fuerza y 5,5 kA de corriente – K6:6 ciclos; 2000 N de fuerza y 6,5 kA de corriente). Micrografías de la interfase soldada.

La Figura 12 muestra los resultados de microdureza mínimos obtenidos para probetas soldadas con tiempos de soldadura de 4, 6, 8 y 10 ciclos, igual corriente promedio (5,5 kA) y diferente presión (750 a 2500 N). Además, la línea puntada representa el valor promedio obtenido para el metal base (210 HV).

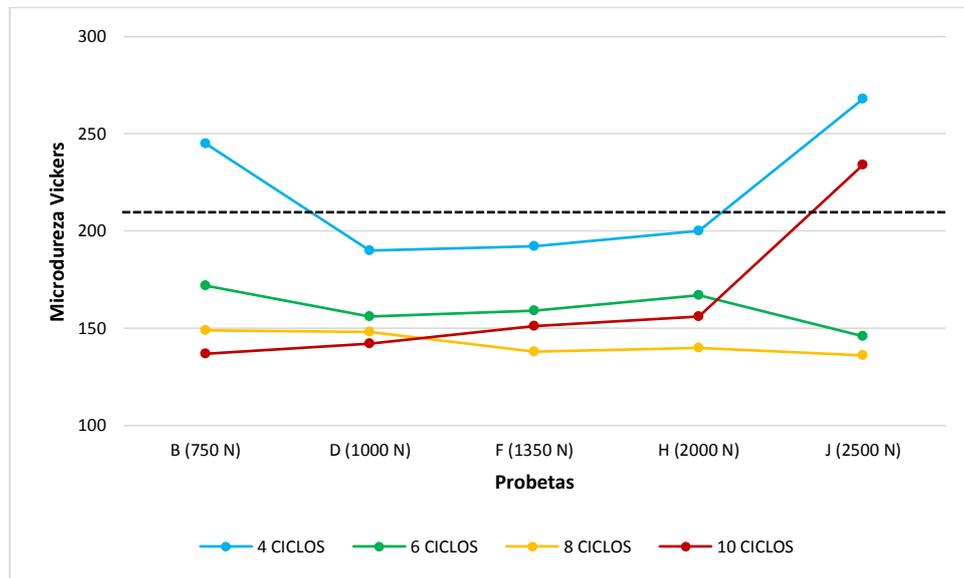


Figura 12: Valor mínimo de microdureza para probetas soldadas con distintas fuerzas.

En general, no se observa un efecto de la fuerza sobre los valores mínimos de microdureza obtenidos, a excepción de la probeta soldada con un tiempo de 10 ciclos, donde estos valores aumentan a medida que se incrementa dicha fuerza, superando, incluso, en el caso de la probeta J10 el valor promedio obtenido para el metal base. Por otro lado, puede observarse que para las probetas soldadas con 4, 6 y 8 ciclos el valor mínimo de microdureza disminuye a medida que el tiempo de soldadura aumenta. Este efecto está asociado al mayor aporte de calor mencionado anteriormente al aumentar el tiempo de soldadura. En general, los valores de microdureza mínimos se encuentran por debajo del promedio obtenido para el metal base, solo tres probetas

superan dicho valor (B4, J4 y J10). En este sentido, debe tenerse en cuenta que el material base se encuentra deformado en frío por lo que la dureza es mayor, aunque tenga una estructura prácticamente ferrítica.

4.3 Resistencia al corte de las uniones soldadas

La Figura 13 permite observar la relación entre la carga de rotura y la fuerza aplicada para uniones realizadas con corrientes de 4,5 y 5,5 kA respectivamente. Las líneas punteadas indican el mínimo valor para la carga de rotura por corte establecido por norma [5], y la franja coloreada representa los valores estadísticos para productos comerciales obtenidos del Centro de Investigación y Desarrollo en Mecánica - Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI-Mecánica).

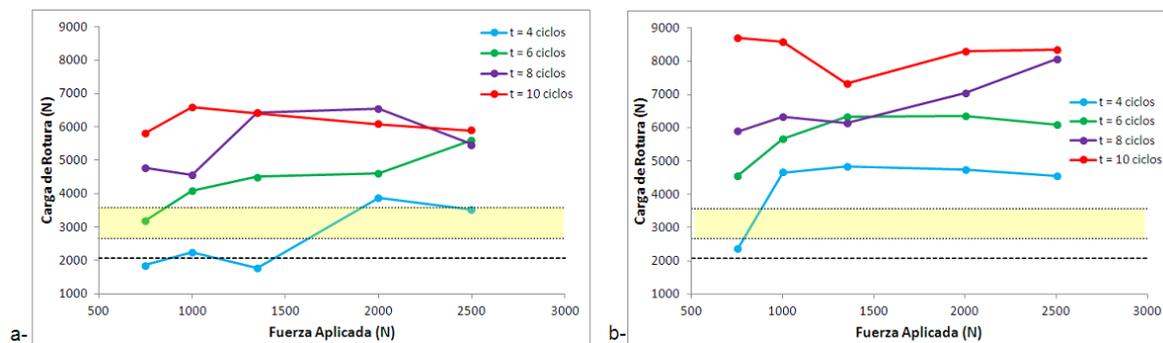


Figura 13: Relación entre la carga de rotura y la fuerza aplicada para uniones realizadas con una corriente de: a- 4,5 kA, b- 5,5 kA y fuerzas que van desde los 750 a 2500 N en cada caso.

Al comparar ambos gráficos se observan mayores cargas de rotura para las probetas soldadas con mayor corriente promedio (5,5 kA) y mayor tiempo de soldadura, debido a un mayor aporte de calor que mejora la resistencia mecánica de la junta [9,10]. Asimismo, se observa que existe una fuerza de apriete característica, por encima de la cual la carga de rotura no aumenta. Esta fuerza característica cambia con el tiempo de soldadura y con la corriente de soldadura empleados.

Solo dos probetas no alcanzaron el valor mínimo de carga de rotura por corte establecido por norma, ellas son: A4 y E4, mientras que las probetas B4 y C4 apenas superan el mínimo establecido. Sin embargo, la probeta D4 supera ampliamente dicho límite y los valores estadísticos de los productos comerciales, tal como puede observarse en la Figura 13b. Para el caso de la serie soldada con 4 ciclos y 5,5 kA de corriente, la fuerza característica es de 1000 N. Este hecho pone de manifiesto que un bajo número de ciclos complementado con un nivel de corriente y presión adecuados, resulta en una resistencia al corte por encima de los valores especificados. Sin embargo, la rotura se produce en la ZAC de la soldadura, probablemente controlada por la zona de mínima dureza. Este hecho no es un defecto, sino que para la normativa es una unión aprobada.

4.4 Parámetros óptimos

Del conjunto de probetas analizadas, 11 de ellas rompieron en el metal base, la mayor parte corresponde a Series por encima de la E, es decir, con fuerzas a partir de los 1350 N y corrientes de 5,5 kA, a excepción de las probetas B10 y D10, las cuales si bien fueron soldadas con niveles bajos de fuerza, corriente intermedia (5,5 kA) y elevados tiempos de soldadura (10 ciclos). Las series A, B, C, D y E fallaron, en general, en la soldadura, interfase o soldadura-metal base. Si bien la normativa acepta a aquellas muestras que no rompan por la interfase, aquellas que lo hagan por el MB presentan una calidad superior.

La Figura 14 muestra la carga de rotura de las probetas que fallaron en el MB, así como también el valor de microdureza promedio obtenido en cada caso. En primer lugar, puede observarse que todas las probetas superaron ampliamente el mínimo establecido para el ensayo de rotura. Por otro lado, las probetas F6 y H6 presentan un valor promedio de microdureza muy similar al del metal base (210 HV). Sin embargo, la que presenta menor indentación y no presenta un flujo plástico excesivo en la zona de la junta es la probeta F6.

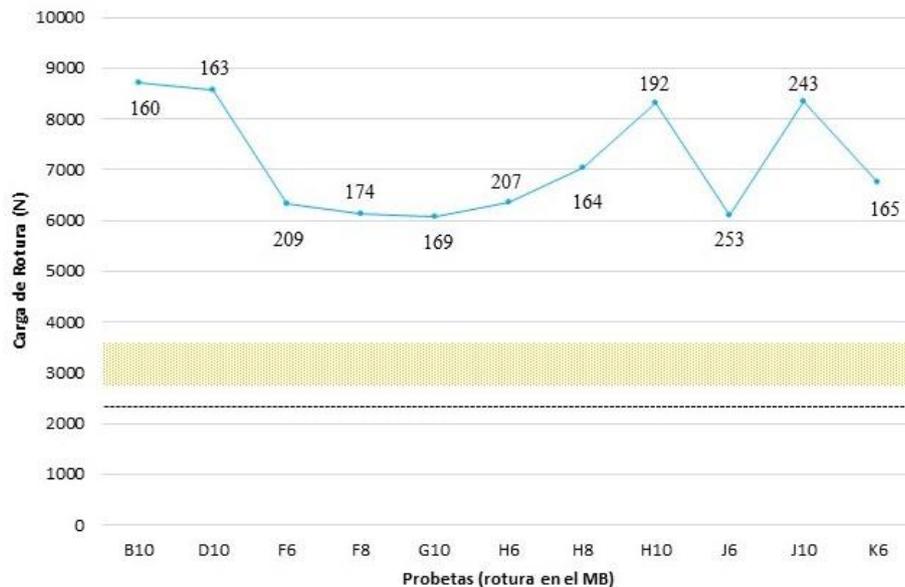


Figura 14: Carga de rotura de las probetas que fallaron en el metal base y valor de microdureza promedio.

Puede verse que esta condición de soldadura, presenta un bajo tiempo de soldadura, con fuerza de apriete y corriente de soldadura intermedias, lo que permite un buen equilibrio entre los distintos aspectos operativos, una elevada productividad y una alta durabilidad de los electrodos. Asimismo, esta condición muestra una carga de rotura significativamente superior a las mostradas por las muestras comerciales y la fractura se ubica en el material base. En este sentido, esta configuración se considera como una de las que optimizan esta unión.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió el efecto del tiempo de soldadura, corriente y fuerza de los electrodos sobre la unión de juntas soldadas por proyección. A partir de los resultados obtenidos, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Con el aumento del tiempo de soldadura y la utilización de fuerza y corriente intermedias, las probetas soldadas presentaron excesiva indentación y elevado flujo plástico, mientras que las probetas soldadas con bajos parámetros de soldadura resultaron aceptables desde el punto de vista macrográfico.
- Los valores de microdureza disminuyen al aumentar el número de ciclos y el nivel de corriente promedio.
- La carga de rotura aumentó con el tiempo, corriente y fuerza de soldadura aplicados.
- Las probetas con mayor carga de rotura, fracturaron en el MB en una condición de tracción dúctil.
- Cuando los parámetros de soldadura fueron insuficientes la interfase resultó discontinua.
- Un bajo número de ciclos complementado con un nivel de corriente y presión adecuados, resulta en una resistencia al corte, por encima de los valores especificados por norma.
- La probeta F6 (6 ciclos, 1350 N y 5,5 kA) presenta una microdureza promedio y comportamiento macro y microestructural similar al obtenido para el perfil comercial. Además, su respuesta frente a la resistencia al corte resultó satisfactoria respecto a los valores establecidos por norma. Para la condición mencionada se logró aumentar significativamente la resistencia de la unión respecto a los valores comerciales, lo que representa el desarrollo de un procedimiento optimizado respecto al actualmente utilizado.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa Acindar por la provisión de materiales para la realización de este trabajo.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] MENÉNDEZ MÉNDEZ, E., Interacción del hormigón con el medioambiente. Acciones físico-químicas, In: Durabilidad, Rehabilitación y Sostenibilidad, Cursos avanzados Eduardo Torroja, Madrid, 2014.
- [2] IRAM-IAS U 500 26: “Alambres de acero para armadura en estructuras de hormigón”.
- [3] ZHANG, H., SENKARA, J., Resistance Welding: Fundamentals and Applications, New York, CRC. Taylor & Francis, 2006.
- [4] ASTM E 384-99: “Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials”, 1999.
- [5] IRAM-IAS U 500-06: “Mallas de alambres de acero soldados para armadura en estructuras de hormigón”, 2004.
- [6] WEMAN, K., Welding Processes Handbook. Ed CRC., 2003.
- [7] O'BRIEN, R. L., Manual de Soldadura. 8 ed., Tomo II. Capítulo 17. American Welding Society. 1996.
- [8] O'BRIEN A., JENNEY C., Welding Handbook. 9 ed., v.1, American Welding Society.
- [9] AKKAS N., VAROL F., FERIK E., *et al.*, “Effect of Welding Current on Mechanical Properties of Welding Joints in S235JR(Cu) steel Sheets in Resistance Spot Welding”, In: Proceedings of 3rd International Congress APMAS 2013, 24-28, Antalya, Turkey, April 2013.
- [10] AKKAS N., ILHAN E., “Effect of Welding Current on Mechanical Properties of Welding Joints in SPA-C Steel Sheets in Resistance Spot Welding”, In: Proceedings of 3rd International Congress APMAS 2013, 24-28, Antalya, Turkey April 2013.