



SOLDADURA DE RECARGUE CON ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX

Sebastián Zappa^{1,2}, Juan Martínez¹, Hernán Svoboda^{2,3} y Estela Surian⁴

¹ Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Lomas de Zamora
Ruta 4, km 2, Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina
correo-e: zappasebastian@hotmail.com

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Godoy Cruz 2290, CABA, Argentina

³ GTSyCM3, INTECIN, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Av. Las Heras 2214, CABA, Argentina

RESUMEN

Los aceros inoxidable dúplex se caracterizan por poseer una estructura dual constituida por ferrita y austenita en iguales proporciones. Poseen una combinación de buenas propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión, que dependen de la composición química y de la relación entre las fases mencionadas. Son ampliamente utilizados en las industrias de procesos químicos y, fundamentalmente, del petróleo y gas. La soldadura de recargue, es utilizada en las industrias de fabricación y reparación para aumentar la vida útil de los componentes a menores costos. Las propiedades superficiales del recubrimiento dependen de la composición química y la microestructura en esa zona, las que a su vez, quedan definidas por el porcentaje de dilución y el procedimiento de soldadura. Si bien existen en la literatura trabajos donde se ha investigado la optimización de los parámetros de soldadura en recubrimientos con depósitos dúplex, están en general orientados al modelado numérico y no se ha encontrado un análisis microestructural sistemático. El objetivo de este trabajo fue el de estudiar el efecto del calor aportado (bajo, medio y alto) y de la cantidad de capas (una y dos) en recargues con depósitos inoxidable dúplex sobre la macroestructura, composición química, dilución, microestructura y dureza. Para tal fin, se soldaron 6 cupones de recargue mediante el proceso de soldadura semiautomática con protección gaseosa. Se realizó un análisis dimensional de los cordones, se determinó la composición química por medio de espectrometría de emisión óptica, se calculó la dilución geométrica y química, se caracterizó la microestructura por medio de microscopía óptica y electrónica de barrido y se midió la microdureza Vickers. Para una capa, el equilibrio microestructural en recargues con aceros inoxidable dúplex está controlado principalmente por el grado de dilución y para dos capas por el calor aportado.

Palabras Claves: Soldadura Semiautomática, Acero Inoxidable Dúplex, Recargue, Microestructura



1. INTRODUCCIÓN

La soldadura de recargue se utiliza para la protección de superficies sometidas a servicios específicos (soldadura de revestimiento o cladding). En los últimos años, el recargue se ha implementado en numerosas industrias, por una cuestión económica, generando una solución a los problemas de la ingeniería y reducción de costos. Las industrias principales de aplicación son: del papel, químicas, de procesamiento de alimentos, nuclear e industrias del gas y del petróleo, fundamentalmente [1]. El concepto general del recargue se basa en depositar una capa de material con propiedades específicas, fundamentalmente resistencia a la corrosión o desgaste, sobre un elemento o pieza diseñada para soportar solo los esfuerzos mecánicos. En particular, las características deseables de los materiales de recargue inoxidables a depositar son: buena resistencia a la corrosión generalizada y localizada, soldabilidad y propiedades mecánicas. Los aceros inoxidables dúplex (DSS) poseen todas estas características: tienen altas resistencias a la corrosión generalizada y localizada, son soldables y poseen buenas propiedades mecánicas [2].

Estos materiales se caracterizan por poseer una estructura dual constituida por ferrita y austenita, en proporciones similares. Poseen una combinación de buenas propiedades en tracción, tenacidad y resistencia a la corrosión, que dependen de la composición química, de la relación entre las fases mencionada anteriormente y a la presencia de otras fases secundarias. Se ha encontrado que la precipitación de dichas fases, tales como nitruros de cromo (Cr_2N), austenita secundaria (γ_2) y compuestos intermetálicos, como ser fase sigma (σ) y chi (χ) tienen una gran influencia sobre las propiedades y el rendimiento de estos aceros [3].

En función del procedimiento de soldadura empleado se puede perder el equilibrio entre fases y generar la precipitación de fases secundarias obteniendo una pérdida importante de las propiedades. En términos generales, en soldaduras de DSS, altas velocidades de enfriamiento, pueden dar como resultado una excesiva cantidad de ferrita y la precipitación de nitruros. Por otro lado, una baja velocidad de enfriamiento puede generar un mayor contenido de austenita y la precipitación de fases intermetálicas [4]. Además, la composición química, la microestructura y las diferentes propiedades de los materiales de recargue son dependientes del grado de dilución del metal aportado por el consumible y el metal base fundido, sobre el cuál se deposita y se mezcla. La dilución reduce la concentración de elementos de aleación y aumenta el contenido de C en la capa de recargue (dado que el material base, generalmente, posee mayor contenido de este elemento que un DSS), lo que disminuye las propiedades de resistencia a la corrosión y causa otros problemas metalúrgicos. Además, un grado de dilución no controlado, puede producir un desequilibrio de las fases microestructurales presentes (50 % de ferrita y 50 % de austenita), que caracterizan a estos aceros [1, 2].



La literatura [2], ha investigado la optimización de los parámetros de soldadura en recubrimientos con depósitos dúplex. Sin embargo, estos trabajos están orientados a la simulación numérica y no han proporcionado un análisis sobre las características geométricas, el equilibrio microestructural y la dureza del recargue.

El objetivo de este trabajo fue el de estudiar el efecto del calor aportado (bajo, medio y alto) y de la cantidad de capas (una y dos) sobre las características geométricas del cordón, la composición química, el grado de dilución, la microestructura y la dureza en depósitos de soldadura de acero inoxidable dúplex utilizando el proceso de soldadura semiautomático con protección gaseosa.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se soldaron seis cupones de soldadura de recargue mediante el proceso de soldadura semiautomático con protección gaseosa. Se utilizaron los mismos parámetros eléctricos para todos los casos, pero se modificó la velocidad de soldadura, de manera de generar tres niveles diferentes calor aportado (diferentes velocidades de enfriamiento). Asimismo, se soldaron cupones con una y dos capas. La primer capa fue de cinco cordones en la segunda de cuatro. El consumible empleado fue un alambre tubular (FCAW) de 1,2 mm de diámetro que deposita un acero inoxidable dúplex. La posición de soldadura fue plana y realizada en forma mecanizada. El gas de protección fue Ar+20 %CO₂, con un caudal de 18 L/min y la distancia entre el pico de contacto y la pieza, en todos los casos, fue de 20 mm. Las chapas base utilizadas fueron de acero comercial de bajo contenido de C de 3" x 3/8" x 250 mm. La Tabla 1 muestra la composición química de la chapa base, determinado por espectrometría de emisión óptica, y del metal de aporte puro del consumible utilizado, reportado por el fabricante. La Tabla 2 muestra la identificación de cada cupón en la que se indica la cantidad de capas (1 o 2) y el nivel de aporte térmico (A: alto, M: medio, B: bajo). Asimismo, se presentan los parámetros de soldadura promedio y el calor aportado para cada caso.

Se extrajeron cortes transversales para la caracterización macroestructural, se determinaron las características geométricas de los recargues (penetración, ancho y alto) y dilución geométrica por medio del área de metal base fundido (B) dividido el área total (A + B) [2], como se muestra en la Figura 1. En la superficie de los recargues se midió la composición química por espectrometría de emisión óptica (OES). Con estos datos, se determinó la dilución química definida como la diferencia entre la composición química del metal de aporte puro y la medida experimentalmente. Se caracterizó la microestructura mediante microscopías óptica (LM) y electrónica de barrido (SEM). Se realizó la cuantificación de las fases presentes por medio de metalografía color a 500x en 40 imágenes para cada condición. Además, se midieron 20 valores de microdureza Vickers con 1 kg de carga (H_{V1}) sobre las superficies de los recargues, reportándose el promedio de los mismos.



Tabla 1. Composición química de los materiales utilizados

Material	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)
Chapa A° al C	0,1	0,2	0,58	-	-	-
Consumible DSS	0,03	0,8	0,9	22,7	9,1	3,2

Nota: Valores expresados en porcentaje en peso

Tabla 2. Identificación de las probetas y parámetros de soldadura utilizados

Cupón	Tensión (V)	Corriente (A)	Velocidad de soldadura (mm/seg)	C. aportado (kJ/mm)
D1B	28	196	9,7	0,6
D1M	28	195	6,4	0,9
D1A	28	200	3,1	1,8
D2B	28	195	9,7	0,6
D2M	28	195	6,4	0,9
D2A	28	200	3,1	1,8

Nota: C. aportado: Calor aportado = Tensión x Corriente / Velocidad de soldadura

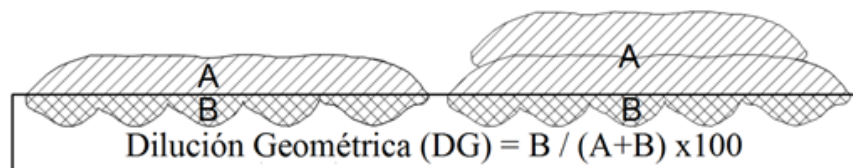


Figura 1: Determinación de la dilución geométrica

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra el aspecto superficial de los cupones de recargue obtenidos. Se pueden observar bajos niveles de salpicaduras y de escoria, en todos los cupones. Además, los cordones presentaron una buena terminación superficial. Sin embargo, puede verse una gran cantidad de poros vermiculares superficiales asociados a los gases que quedan atrapados debajo de la escoria. La Figura 3 muestra imágenes de cortes transversales de los recargues. En las mismas, se observa la chapa base, la zona afectada por el calor y el metal de soldadura conformando el recargue. En la mayoría de los cupones soldados, se pueden observar islas de escoria atrapada entre cordones.

Según la literatura [5], la geometría del cordón es directamente proporcional al calor aportado. En la Tabla 3 se presentan los valores de las dimensiones de los cupones: penetración, ancho y altura, medidas sobre cada uno de los recargues. La Figura 4 muestra la evolución de las características geométricas en función al calor aportado.

Al aumentar el calor aportado se observó un aumento en todos los parámetros geométricos de los recargues, manifestándose en un aumento del área transversal de los cupones. El ancho y la altura



del recargue, aumentaron al aumentar el calor aportado (controlado por la velocidad de soldadura). Al disminuir la velocidad aumenta el calor aportado por unidad de longitud, generando un aumento en el ancho y la altura del depósito [5]. Por otro lado, no se observaron grandes variaciones en la penetración. No se detectaron variaciones significativas con la cantidad de capas.

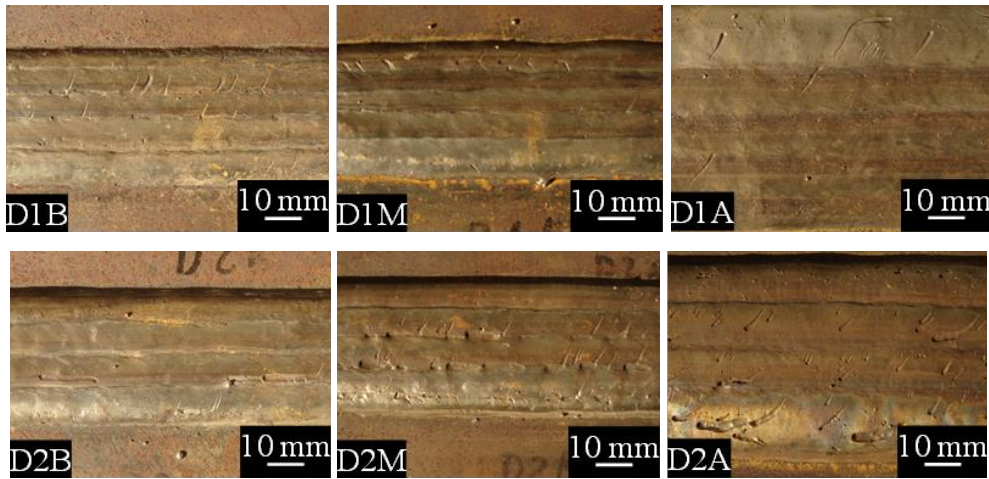


Figura 2: Aspecto superficial de los cordones

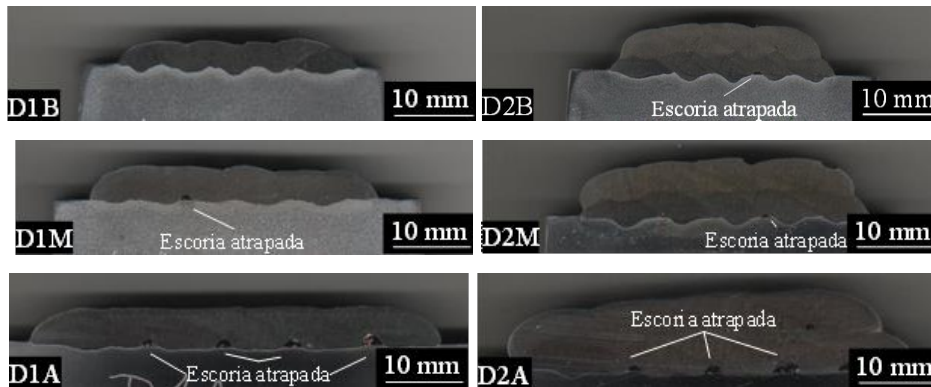


Figura 3: Aspecto superficial de los cordones

Tabla 3. Características y dilución geométrica

Muestra	Penetración (mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)	B (mm ²)	A+B (mm ²)	Dilución geométrica (%)
D1B	1,1	30,8	3,6	19,2	103,7	18,5
D1M	1,2	37,9	4,6	25,3	159,9	15,8
D1A	1,0	54,0	4,9	27,5	234,7	11,7
D2B	1,0	29,5	6,5	18,5	171,8	10,8
D2M	1,2	38,2	7,6	24,0	269,0	8,9
D2A	1,1	52,8	10,2	35,9	422,1	8,5

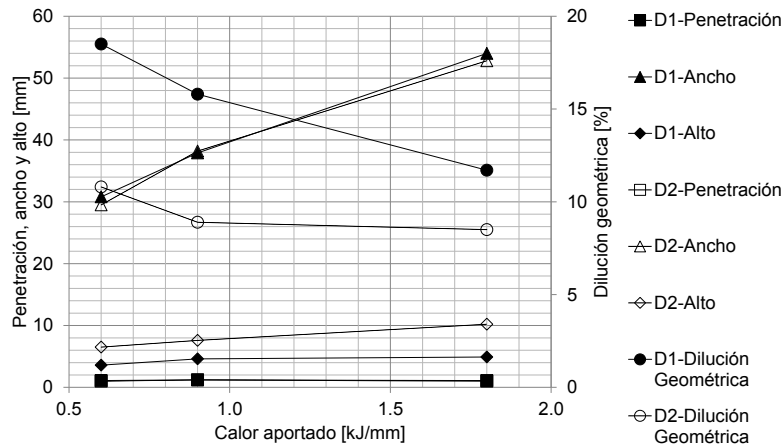


Figura 4: Características y dilución geométricas

La dilución geométrica osciló entre un 9 y un 20 %, aproximadamente, para las distintas condiciones de soldadura. En este sentido, el hecho de que la dilución se haya encontrado entre estos valores, es un dato relevante, dada la importancia de la composición química en la formación de las fases microestructurales [1]. El porcentaje de dilución del metal base en la pileta líquida disminuyó con el aumento del calor aportado y de una a dos capas. Estos hechos podrían estar asociados a que al aumentar el calor aportado y/o la cantidad de capas del recargue, se generan mayores volúmenes de material aportado respecto del volumen de material base fundido, dando como resultado la disminución de la dilución geométrica. Sin embargo debe tenerse en cuenta que si el aporte térmico se aumenta a través de un aumento de la corriente el resultado de la dilución podría ser diferente.

La Tabla 4 muestra la composición química de los recargues en la superficie y el cálculo de la dilución química. La Figura 5 muestra la evolución de la composición química y la dilución química al aumentar el calor aportado para una y dos capas. En dicha imagen se puede observar que al aumentar el calor aportado disminuye la dilución química (al igual que lo observado en la Tabla 3 respecto a la dilución geométrica), generando el enriquecimiento de elementos de aleación.

Tabla 4. Composición y dilución química

Muestra	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Dilución química promedio (%)
D1B	1,0	18,6	7,6	2,5	19
D1M	1,0	19,8	8,2	2,7	13
D1A	1,0	21,3	8,7	2,9	6
D2B	1,0	21,0	8,7	2,9	8
D2M	1,1	21,7	8,8	3,0	5
D2A	1,0	22,2	9,0	3,1	2

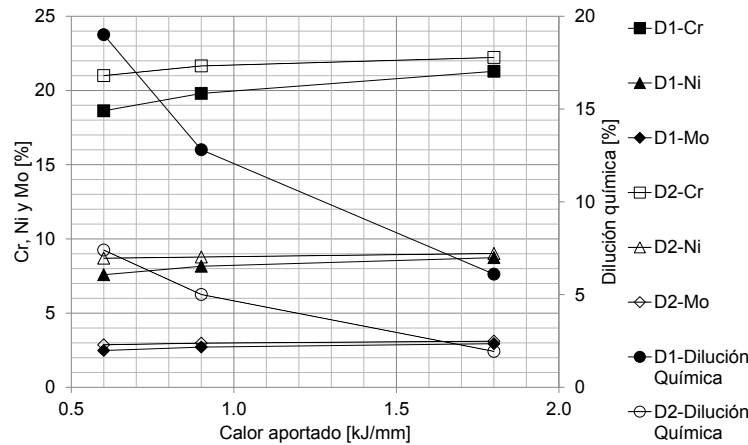


Figura 5: Composición y dilución química

El calor aportado es una medida relativa de la energía transferida por unidad de longitud soldada, siendo un factor de relevancia ya que afecta la velocidad de enfriamiento y el grado de dilución de los depósitos, lo cual define la evolución microestructural y las propiedades finales del metal depositado. Según la literatura [1] a mayor calor aportado, menor contenido de ferrita en la microestructura. Esto está asociado a que al aumentar el calor aportado disminuye la velocidad de enfriamiento y el tiempo de transformación de ferrita en austenita es mayor, dando como resultado un menor contenido de ferrita en la microestructura. Además, con mayor aporte térmico, la pileta líquida permanece más tiempo en este estado, posibilitándose una mayor oxidación de los elementos de bajo potencial de oxidación, que pasan como óxidos a la escoria o al medio, disminuyendo así su contenido en el metal depositado, entre ellos el Cr, uno de los más oxidables y el principal elemento ferritizante [6]. Además, la dilución es un aspecto de gran importancia en la soldadura, fundamentalmente en recubrimientos, donde se buscan bajos niveles de dilución, ya que la misma altera la composición química final de los cordones y, por ende, la microestructura resultante. Cuando la dilución es baja, la composición química del recubrimiento es cercana a la composición química del consumible y las propiedades finales del recubrimiento son las deseadas [1]. La literatura [7], menciona que al aumentar los niveles de dilución el contenido de ferrita en la microestructura disminuye. Un aumento de la dilución provoca un aumento en el contenido de C y reduce los contenidos de Cr y Ni del material de recargue, aumentando el contenido de austenita.

El calor aportado, modificado por medio de la velocidad de soldadura, influyó en la microestructura de los depósitos, al igual que la cantidad de capas, debido a lo mencionado anteriormente. La Figura 6 muestra las microestructuras obtenidas para los recargues soldados. En todos los casos la microestructura estuvo constituida por dos fases, una oscura (ferrita) y otra clara (austenita). No se encontraron variaciones significativas observables para los diferentes cupones de soldadura, mediante esta técnica. Sin embargo, se pudo observar que la microestructura no estuvo



balanceada (50 % ferrita y 50 % austenita) y hubo mayor contenido de austenita en todos los casos de estudio. Además, se pudo observar que la microestructura en la zona afectada por el calor entre cordones (zona recristalizada) estuvo conformada por grandes placas de ferrita con altos contenidos de austenita secundaria en el interior de las mismas.

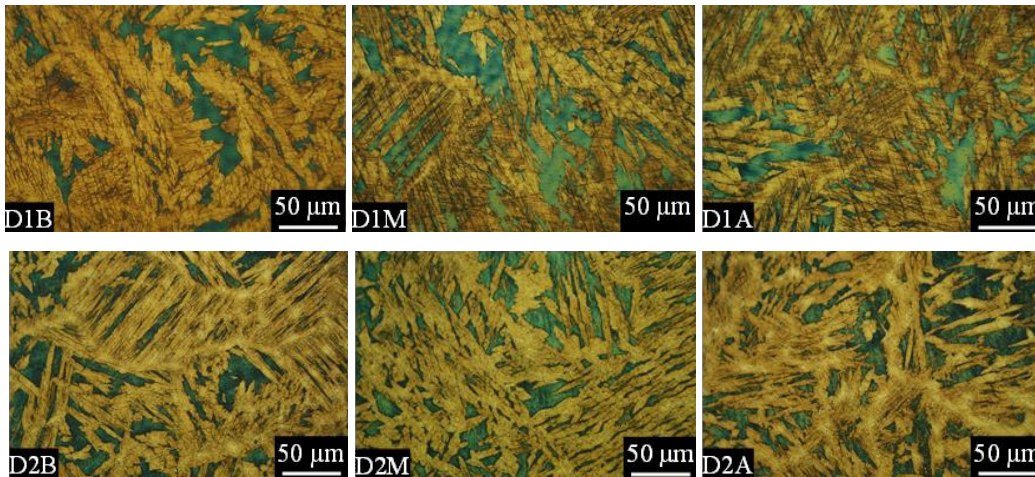


Figura 6: Microscopía óptica

La Figura 7 muestra imágenes de microscopía electrónica de barrido. En las mismas se pueden observar placas de austenita en una matriz de ferrita. Además, en la muestra D2B, se puede observar un gran contenido de austenita secundaria dentro de las placas de ferrita en zona recristalizada entre cordones. La literatura reporta [8] que la zona recristalizada experimenta un recalentamiento que se describe en tres etapas:

- 1) El material es calentado a muy alta temperatura (sin alcanzar la temperatura de fusión). A esta temperatura, la austenita comienza a transformarse en ferrita hasta que, eventualmente, la estructura es completamente ferrítica. En esta instancia, la mayoría de los posibles precipitados (carburos, nitruros, etc.) comienzan a disolverse.
- 2) Una vez alcanzada la temperatura pico ocurre crecimiento de grano de la ferrita, ya que no hay segundas fases o precipitados que inhiban su crecimiento.
- 3) Durante el enfriamiento, la austenita nuclea y crece, mientras que los precipitados se vuelven a formar.

La transformación de ferrita a austenita es dependiente de la composición química y de la velocidad de enfriamiento. Con una alta velocidad de enfriamiento, no hay tiempo suficiente para la transformación de ferrita en austenita, dando como resultado un alto contenido de ferrita en la zona afectada por el calor [8]. Además, según la literatura [8] los Cr_2N son sitios preferenciales para la nucleación de austenita secundaria y puede ocurrir gran cantidad de precipitación durante el



recalentamiento en DSS. Los múltiples recalentamientos, como los experimentados en soldaduras multipasadas, pueden conducir a una gran cantidad de austenita secundaria. Lo discutido anteriormente puede indicar la existencia de nitruros de cromo en la microestructura, no identificados con las técnicas utilizadas en este trabajo.

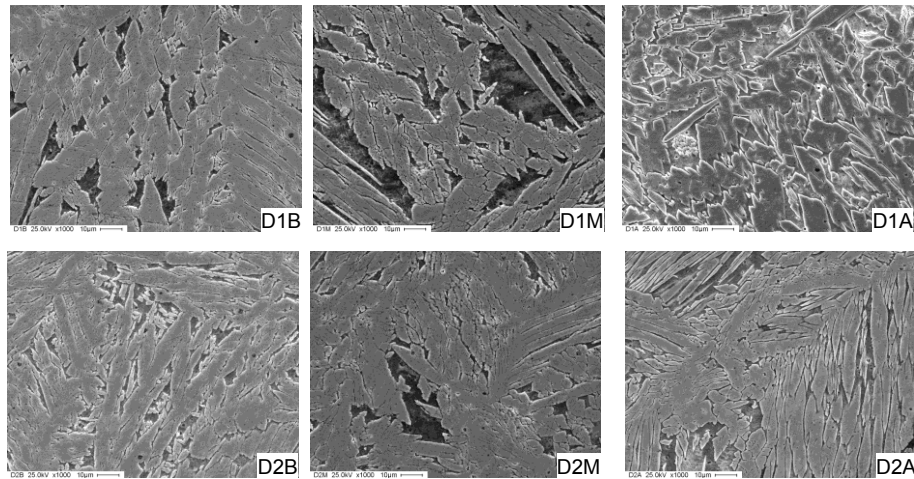


Figura 7: Microscopía electrónica de barrido

La Tabla 6 presenta los contenidos de ferrita, de austenita y los valores promedio de microdureza de cada muestra. En la Figura 8 se observa la relación de estas propiedades con el calor aportado. De acuerdo con estos resultados se presentan dos efectos opuestos. Se puede observar que el aumento del calor aportado generó un aumento del contenido de ferrita para los recargues soldados con una capa. Sin embargo, ocurrió el efecto contrario para los recargues soldados con dos capas. Por un lado, al disminuir la velocidad de soldadura, disminuye la dilución con la chapa base, dando como resultado un mayor contenido de ferrita [1, 2, 7]. Por otro lado, una disminución de la velocidad de soldadura genera un mayor calor aportado y tiempo de transformación de ferrita en austenita durante el enfriamiento, dando como resultado un menor contenido de ferrita en la microestructura [9, 10]. En este sentido, a partir de lo observado en las diferentes condiciones analizadas, para los recargues soldados con una capa, la dilución tiene un mayor efecto sobre el equilibrio microestructural en soldadura de aceros inoxidable dúplex que la velocidad de solidificación (tiempo de transformación de ferrita en austenita). Sin embargo, para los recargues soldados con dos capas con diluciones bajas y prácticamente constante (entre el 2 y 8 %, Tabla 4), existe un mayor efecto del calor aportado ya que el contenido de ferrita disminuye con el aumento del mismo.

Considerando los resultados de dureza para las distintas condiciones de recargue se observa que, si bien no se encontraron grandes variaciones ($20 H_{V1}$), los recargues soldados con una capa presentaron los menores valores respecto a los recargues soldados con dos capas. Para los



recargues de una capa, al aumentar el calor aportado aumenta la dureza. Por otro lado, para los recargues soldados con dos capas, donde se encontraron las menores diferencias de dureza (4 HV₁) al aumentar el calor aportado la dureza disminuyó. Ambos resultados están asociados y controlados con los contenidos de ferrita medidos en la microestructura para estas condiciones [11].

Tabla 6. Cuantificación de ferrita y dureza

Muestra	Ferrita (%)	Austenita (%)	Dureza (HV ₁)
D1B	32	68	242
D1M	36	64	244
D1A	38	62	259
D2B	44	56	266
D2M	39	60	263
D2A	37	62	262

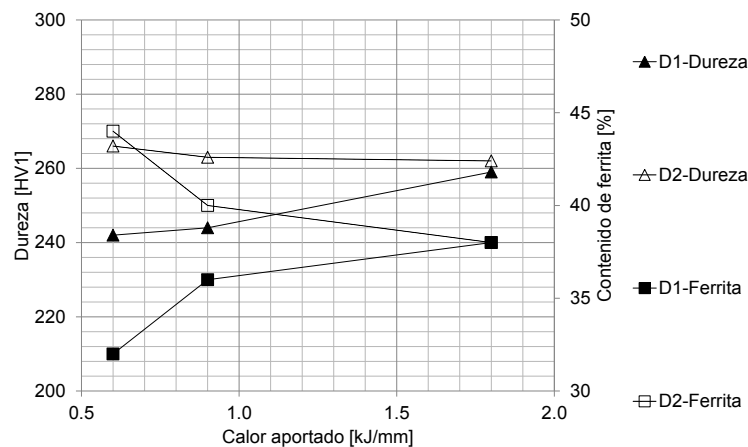


Figura 8: Cuantificación de ferrita y dureza

4. CONCLUSIONES

El aumento del aporte térmico, al disminuir la velocidad de soldadura, en los recargues de aceros inoxidables dúplex generó: un aumento en el ancho y el alto de los cordones, una menor dilución, un mayor contenido de ferrita y una mayor dureza.

Por otro lado, la segunda capa de recargue respecto de una simple, generó menores valores de dilución, acercando la composición química superficial de los recargues a la del consumible. Además, la microestructura estuvo más balanceada, acercándose los contenidos de ferrita al 50%, generando una mayor dureza.



El equilibrio microestructural en recargues con aceros inoxidable dúplex, está controlado principalmente por el grado de dilución para una capa y por el calor aportado para dos capas.

5. REFERENCIAS

- [1] Kannan, T. and N. Murugan, *Prediction of Ferrite Number of duplex stainless steel clad metals using RSM*. Welding Journal, 85, 91, 91s-100s, 2006.
- [2] Kannan, T. and N. Murugan, *Effect of flux cored arc welding process parameters on duplex stainless steel clad quality*. Journal of Materials Processing Technology, 176, 230-239, 2006.
- [3] Bettini, E., et al., *Study of corrosion behavior of a 22% Cr duplex stainless steel: Influence of nano-sized chromium nitrides and exposure temperature*. Electrochimica Acta, 113, 280-289, 2013.
- [4] Karlsson, L., *Welding duplex stainless steels - A review of current recommendations*. IIW Doc., IX-2355-11 (IX-H-736-11), 1-17, 2011.
- [5] Almenara, M.D., et al., *Modelos empíricos para la predicción de la geometría del cordón en soldaduras a tope de un acero inoxidable dúplex 2205*. Dyna, 78, 169, 206-215, 2011.
- [6] Zappa, S., et al. *Efecto del aporte térmico sobre la microestructura y la dureza en soldaduras de acero inoxidable dúplex*. CONAMET-SAM 2014, Argentina 2014.
- [7] KOTECKI, D.J., *Dilution control in single-wire stainless steel submerged arc cladding*. Welding Journal, 75, 2, 35s-45s, 1996.
- [8] Lippold, J.C. and D.J. kotecki, *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Wiley-Interscience ed, USA, 2005.
- [9] Vitec, J., S.A. Davis, and C.R. Hinman, *Improved ferrite number prediction model that accounts for cooling rate effects - Part 1: Model development*. Welding Journal, 82, 1, 10s-17s 2003.
- [10] Vitec, J., S.A. Davis, and C.R. Hinman, *Improved ferrite number prediction model that accounts for cooling rate effects - Part 2: Model results*. Welding Journal, 82, 2, 43s-50-s, 2003.
- [11] Martins, M. and L.C. Casteletti, *Effect of heat treatment on the mechanical properties of ASTM A 890 Gr6A super duplex stainless steel*. Journal of ASTM International, 2, 1, 1-14, 2005.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Daniel Betz de BOHELER Argentina por la provisión del consumible utilizado, a Ricardo Flores de AIR LIQUIDE Argentina por la donación de los gases de soldadura, a Eduardo Asta de ESAB-CONARCO Argentina por los análisis químicos, a Mercedes Pianetti del Laboratorio de Microscopía Electrónica del INTI - MECÁNICA por las imágenes SEM y a la UNLZ por el aporte financiero.