

## **EFFECTO DEL ARCO PULSADO EN DEPÓSITOS CON CONSUMIBLES DE ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX AVANZADOS**

### **EFFECT OF PULSED ARC IN DEPOSITS WITH ADVANCED DUPLEX STAINLESS STEELS CONSUMABLE**

**Sebastián Zappa<sup>1,2</sup>, Lucas Maureira<sup>3</sup>, Mónica Zalazar<sup>3</sup>, Estela Surian<sup>4</sup>**

zappasebastian@hotmail.com, monica.zalazar@fain.uncoma.edu.ar

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (FI-UNLZ), Camino de Cintura y Juan XXIII, 1832, Lomas de Zamora, Argentina.

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Godoy Cruz 2290, 1425, CABA, Argentina.

<sup>3</sup> Universidad Nacional del COMAHUE (FI-UNCOMA), Buenos Aires 1400, 8300, Neuquén, Argentina.

<sup>4</sup> Investigador Independiente, CABA, Argentina.

Recibido 03/02/2019; Aceptado: 01/07/2019

**Resumen:** Los aceros inoxidable dúplex ofrecen una atractiva combinación de resistencia mecánica y resistencia a la corrosión (utilizados en la industria petroquímica). Con procesos de soldadura modernos en modo de transferencia pulsada (GMAW-P) o con doble pulso (GMAW-PP) se obtiene un control más preciso de la transferencia metálica con valores de corriente promedio más bajos y en consecuencia un menor calor aportado, generando una menor distorsión y un menor daño microestructural a las chapas base, comparados con el proceso de soldadura semiautomática convencional (GMAW). El objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto del arco pulsado y del doble pulso sobre las características geométricas del cordón, la dilución con el metal base, la evolución microestructural y la dureza con un consumible de acero inoxidable súper dúplex. En particular, se busca la selección de parámetros de los pulsos que genere una adecuada geometría de cordón para ser utilizada como pasada de raíz.

**Palabras-clave:** Arco Pulsado, Geometría del Cordón, Dilución.

**Abstract:** Duplex stainless steels offer an attractive combination of mechanical strength and corrosion resistance (used in the petrochemical industry). With modern welding processes in pulsed transfer mode (GMAW-P) or with double pulse (GMAW-PP) a more precise control of metal transfer

is obtained with lower average current values and consequently a lower heat input, generating less distortion and less microstructural damage to the base materials, compared with the conventional semiautomatic welding process (GMAW). The objective of this work was to study the effect of the pulsed arc and the double pulse on the geometric characteristics of the bead, the dilution with the base material, the microstructural evolution and the hardness with a super duplex stainless steel consumable. In particular, the selection of pulse parameters that generate an adequate bead geometry to be used as a root pass was sought.

**Keywords:** Pulsed Arc; Bead Geometry; Dilution.

## 1. Introducción

Los aceros inoxidable dúplex (DSS) son materiales estructurales que presentan una excelente combinación de resistencia mecánica, tenacidad y resistencia a la corrosión. El balance microestructural (ferrita y austenita) y el alto contenido de elementos de aleación son los factores más importantes y responsables de la excelente combinación de las propiedades mencionadas (Almenara, et al., 2011; Chehuan, et al., 2014). Los DSS poseen mayor tenacidad y soldabilidad que los aceros inoxidable ferríticos y, prácticamente, el doble de la resistencia mecánica y mayor resistencia a la corrosión por picado y bajo tensiones que los aceros inoxidable austeníticos (Eghlimi, Shamanian & Raeissi, 2014). La combinación favorable de propiedades de estos aceros hace que sean ampliamente utilizados en diferentes industrias, como ser: petroquímicas, nucleares, petróleo y gas (Almenara, et al., 2011). Se utilizan con frecuencia en aplicaciones que poseen soluciones acuosas con altos contenidos de cloruros reemplazando a los aceros inoxidable austeníticos (Eghlimi, Shamanian & Raeissi, 2014). Actualmente, los aceros inoxidable dúplex son soldables por métodos de fusión convencionales, pero son susceptibles a los parámetros de soldadura empleados. Es decir, con un proceso de soldadura por arco eléctrico, son valores de tensión o corriente inadecuados se puede obtener un excesivo calor aportado y generar la pérdida del balance de fases (austenita y ferrita) y la precipitación de fases perjudiciales (sobre todo en aceros inoxidable súper dúplex, de mayor nivel de aleación) disminuyendo sus propiedades (Almenara, et al., 2011; Chehuan, et al., 2014). En la actualidad, el desarrollo de procesos de soldadura semiautomáticos condujo al control de la corriente pulsada, ya sea con un único ciclo GMAW-P o con un doble ciclo GMAW-PP. En GMAW-P, la corriente de soldadura es alternada entre una corriente y tiempo base (la cual no es suficiente para fundir el metal base, pero es suficiente para mantener el arco estable) y una corriente y tiempo pico (la cual puede fundir una pequeña región del metal base) con una frecuencia determinada (Eghlimi, Shamanian & Raeissi, 2014). En GMAW-PP se pueden controlar los parámetros de la corriente soldadura para obtener dos ciclos, uno de alta y otro de baja energía (ciclo caliente y frío, respectivamente). La Figura 1 muestra el aspecto teórico de la corriente de soldadura para ambos modos. La Figura 2 muestra un esquema del

ciclo de corriente en modo de doble pulso. Si la velocidad de soldadura se mantiene constante, realizando un corte transversal se puede observar un perfil de penetración asociado a los ciclos fríos y calientes. Dicho perfil de penetración, además de los parámetros de la corriente, es dependiente de los tiempos de los ciclos fríos y calientes como se muestra en la Figura 3. El empleo de estos modos de soldadura genera varias ventajas: el refinamiento de grano, menores tensiones residuales, baja distorsión y un arco eléctrico estable. Además, El empleo de corriente pulsada causa una mayor velocidad de enfriamiento, que puede ser considerada ventajosa en muchas aplicaciones. Sin embargo, la principal ventaja es el retraso del crecimiento de dendritas ya que produce sitios de nucleación favorables y conduce a una estructura de grano más fina (Eghlimi, Shamanian & Raeissi, 2014). Lippold y Kotecki (Lippold & kotecki, 2005)

informan que el calor aportado es el factor más importante para mantener el equilibrio de fases en DSS. Sin embargo, es escasa la información disponible respecto al efecto de los parámetros de los pulsos en procesos de soldaduras semiautomáticas (GMAW-P y GMAW-PP) sobre la evolución microestructural (equilibrio de fases y precipitados), geometría de los cordones y dilución. Además, otros autores de la literatura moderna (Chehuan, et al., 2014; Madadi, Ashrafzadeh & Shamanian, 2012; Porta, et al., 2003), han estudiado el efecto de la corriente pulsada en depósitos de soldadura de aceros inoxidable dúplex. Sin embargo, dichas soldaduras fueron realizadas por medio del control de onda en procesos de soldadura GTAW y en algunos casos GMAW, sin tener en cuenta los aspectos críticos que son necesarios satisfacer en el cordón de la pasada de raíz. El objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto del arco pulsado y del doble pulso sobre las características geométricas del cordón (ancho, penetración y sobre-espesor), la dilución con el metal base, la evolución microestructural y la dureza en cordones de soldadura de acero inoxidable súper dúplex (SDSS).

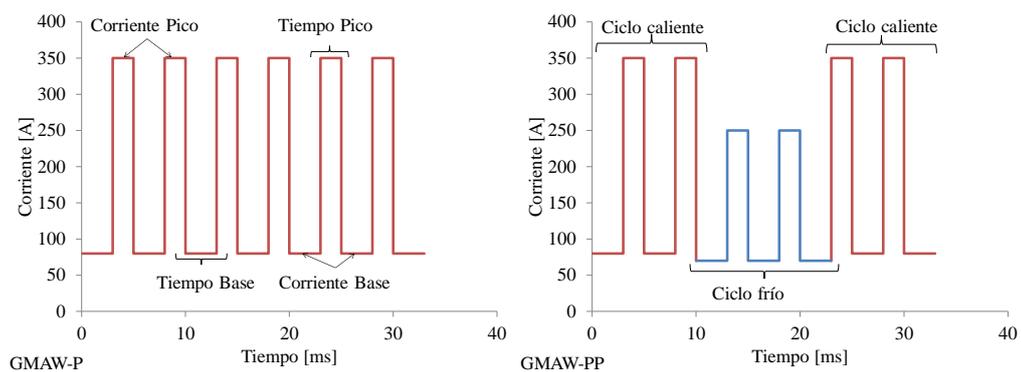


Figura 1 - Geometría de la corriente en soldadura pulsada (GMAW-P) y con doble pulso (GMAW-PP)

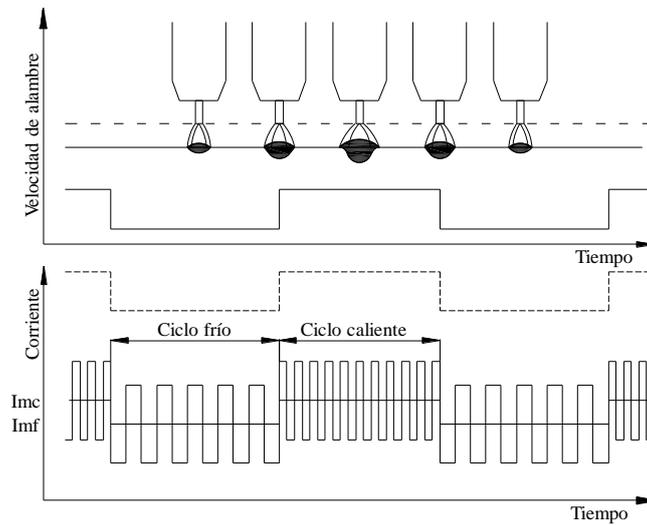


Figura 2 - Esquema de la evolución de la corriente en un modo de doble pulso

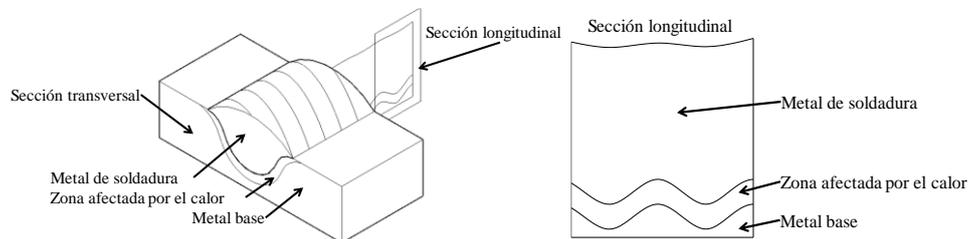


Figura 3 - Esquema del perfil de penetración en modo doble pulsado

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Soldadura

Son varios los parámetros a modificar en corriente pulsada y doble pulso. Para el caso GMAW-P se mantuvo constante la tensión (32 V), la corriente base (80 A), la corriente pico (350 A) y se estudió el efecto de la frecuencia (100, 200 y 284 Hz) modificando la velocidad de avance de soldadura para obtener un calor aportado constante de 0,7 kJ/mm. Para el caso GMAW-PP se mantuvo constante la tensión (32 V), la corriente base (80 A), la corriente pico (350 A) para el ciclo caliente y la tensión (27 V), corriente base (70 A) y la corriente pico (250 A) para el ciclo frío. Además, la frecuencia en ambos ciclos fue de 284 Hz y se estudió el efecto de los tiempos de los ciclos calientes y fríos modificando la velocidad de avance de soldadura para obtener un calor aportado constante de 0,7 kJ/mm. En todos los casos, el tiempo de la corriente pico fue de 2 ms. Para el cálculo de dichos

parámetros y el calor aportado se utilizaron las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) (Madadi, Ashrafizadeh & Shamanian, 2012):

$$\text{Período} = \frac{1}{\text{frecuencia}} \quad (1)$$

$$\text{Tiempo base} = \text{Período} - \text{Tiempo pico} \quad (2)$$

$$\text{Corriente media} = \frac{(\text{corriente base} \times \text{tiempo base}) + (\text{corriente pico} \times \text{tiempo pico})}{\text{tiempo base} + \text{tiempo pico}} \quad (3)$$

$$\text{Calor aportado} = \frac{\text{Tensión} \times \text{Corriente media}}{\text{Velocidad de soldadura}} \quad (4)$$

Se soldaron seis cupones de soldadura (del tipo bead on plate) mediante el proceso de soldadura semiautomático con protección gaseosa automatizando el movimiento de la torcha a velocidad constante por medio de un equipo auxiliar. El consumible utilizado fue un alambre macizo de acero inoxidable superdúplex de 1,2 mm de diámetro. Los materiales base fueron cortes de chapas de acero DSS (ASTM A 790 – UNS 313803) de 70 x 180 x 12,5 mm. El gas de protección empleado fue Ar, de acuerdo a las recomendaciones dadas por el fabricante (BÖHLER, Technical Information, 2010). La distancia pico de contacto-pieza y la posición de la torcha estuvo comprendida entre 15 y 20 mm y 75 y 80 °, respectivamente. El ajuste de parámetros de soldadura estuvo asociado a encontrar un arco eléctrico suave y estable. La Tabla 1 muestra la identificación de los cupones y los parámetros eléctricos utilizados.

Siendo: IDENT: identificación; FRECCC: frecuencia del ciclo caliente; TIEBCC: tiempo base del ciclo caliente; FRECCF: frecuencia del ciclo frío; TIEBCF: tiempo base del ciclo frío; TIECC: Tiempo del ciclo caliente; TIECF: tiempo del ciclo frío; VS: velocidad de soldadura; CA: calor aportado.

Tabla 1 - Identificación de los cupones y parámetros de soldadura utilizados

Condición	Frec <sub>CC</sub> (HZ)	TieB <sub>CC</sub> (ms)	frec <sub>cf</sub> (Hz)	tieB <sub>cf</sub> (ms)	Tie <sub>cc</sub> (s)	Tie <sub>CF</sub> (s)	Vs (mm/s)	CA (kJ/mm)
SP1	100	8,00	-	-	-	-	7,5	0,7
SP2	200	3,00	-	-	-	-	6,0	0,7

<i>SP3</i>	284	1,52	-	-	-	-	4,3	0,7
<i>SPP1-5</i>	284	1,52	284	1,52	0,10	0,50	7,0	0,7
<i>SPP3-3</i>	284	1,52	284	1,52	0,30	0,30	6,0	0,7
<i>SPP5-1</i>	284	1,52	284	1,52	0,50	0,10	5,1	0,7

La Figura 4 muestra la captura de pantalla de un osciloscopio digital donde se puede apreciar, sin escalas en los ejes, la evolución de la corriente (A) con el tiempo (ms) durante la soldadura GMAW-PP. El objetivo de dicho monitoreo estuvo orientado a comprobar los pulsos de corriente entregado por la máquina. En dicha imagen se puede observar un ciclo caliente y frío. Los valores monitoreados por osciloscopio están en concordancia con lo regulado en el equipo de soldadura.

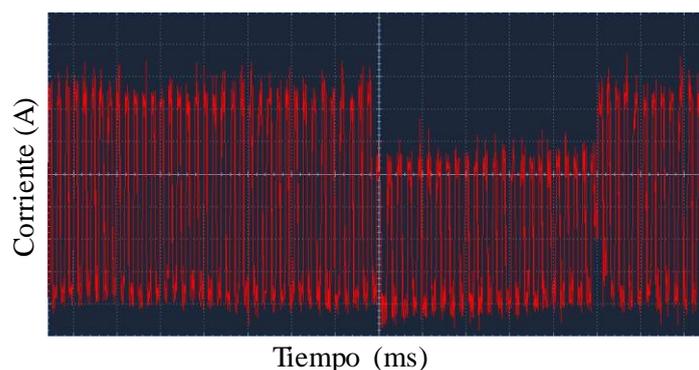


Figura 4 - Evolución de la corriente con el tiempo para un cordón GMAW-PP

Una vez soldados los cordones se realizó una inspección visual, se determinó la composición química por espectrometría de emisión óptica de la chapa base y del cupón SP3 (sobre la superficie del mismo), se tomaron fotos superficiales y se realizaron cortes transversales y longitudinales para la caracterización macro y microestructural. Se midió el ancho, la altura, el perfil de penetración y se calculó la dilución, de acuerdo a lo indicado en la Figura 5 para los cupones soldados con simple pulso. Sobre los cordones soldados con doble pulso se midió el perfil de penetración. Además, se observó la microestructura mediante microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y se analizó la composición química de diferentes fases por espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS). Las superficies de las muestras a examinar fueron preparadas metalográficamente (con papeles lija y paños con pasta de diamante), y atacadas químicamente con reactivo Beraha (1 gr K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + 20 mL HCl + 80 mL H<sub>2</sub>O) (Angelini, Benedetti & Rosalbino, 2004) la cual tiñe de manera preferencial las diferentes fases (oscuro la ferrita y claro la austenita) durante 7 segundos. Se determinó el contenido de ferrita y austenita mediante un ferritómetro y mediante metalografía color con el software Image J en metal de soldadura y zona afectada por el calor. Finalmente, sobre los cortes transversales se realizó un barrido de microdureza Vickers con 1 kg

de carga cada 1 mm sobre la línea central del cordón, reportándose en valor promedio para del metal de soldadura.

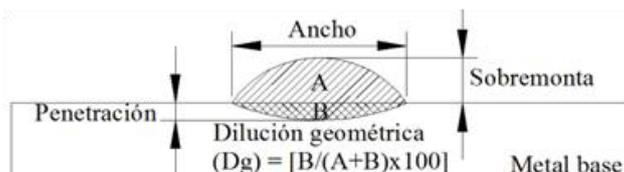


Figura 5 - Geometría de los cordones; Dg: dilución geométrica

### 3. Resultados y Discusión

No se observaron discontinuidades superficiales mediante la inspección visual. En la Tabla 2 se muestran los resultados de la composición química del material base y del cupón SP3. En dicha tabla se puede observar una composición química característica de aceros inoxidable dúplex. Sin embargo, en los cordones soldados con consumibles SDSS, se pudo observar un alto contenido de Mo (6,3 %), mayor a lo reportado el fabricante (3,6 %) (BÖHLER, Technical Information, 2010) y contenidos superiores de Ti y W, respecto a la chapa base.

Tabla 2 - Composición química del material base y los consumibles

Nombre	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	Ti	V	W	Fe
Material base	22,1	5,8	3,1	1,2	0,3	0,14	0,01	0,08	0,06	Balanceado
Consumible SDSS	26,2	8,0	6,8	0,9	0,5	0,17	0,06	0,08	0,95	Balanceado

La Figura 6 muestra imágenes de la superficie de los cupones soldados. En dicha imagen se puede observar un bajo nivel de salpicaduras, indicando un arco eléctrico suave y estable. Además, no se evidenciaron ningún tipo de irregularidad o defecto en los cordones soldados. Para los cupones GMAW-P se puede observar que a medida que aumenta la frecuencia del pulso de corriente (de 100 a 280 Hz) la superficie de los cordones pierde ondulaciones (se hace cada vez más lisa). Esto está asociado a que, al aumentar la frecuencia de los pulsos, la piqueta líquida se hace más caliente, incluso aumentando la velocidad de soldadura. De la misma manera, para los cordones de soldadura soldados con un doble pulsado, GMAW-PP, se puede observar que a medida que, a menores tiempos del ciclo caliente, las superficies de los cordones presentan mayores ondulaciones. La ondulación superficial de cada cordón está asociada a la velocidad de solidificación de las gotas correspondientes a cada ciclo (caliente y frío) y es una apariencia característica de los procesos por arco pulsado.

La Figura 7 muestra imágenes macroestructurales (cortes transversales) de los cordones soldados. Se puede observar que los parámetros de la corriente del simple o doble pulso controla la geometría de los cordones, a pesar de que el calor aportado en todos los casos se mantuvo constante (0,7 kJ/mm). En la Tabla 3 se presentan los resultados de las mediciones de las características geométricas de los

cordones (ancho, espesor y sobreespesor). Además, se muestran los valores del cálculo de la dilución geométrica, determinados de acuerdo a la Figura 5.

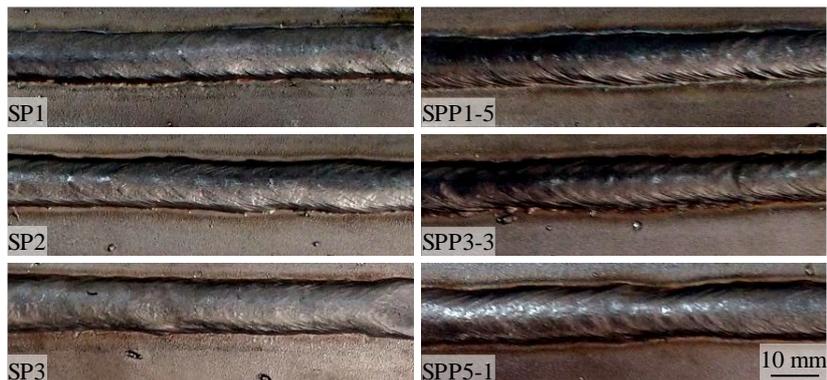


Figura 6 - Apariencia superficial de los cupones soldados

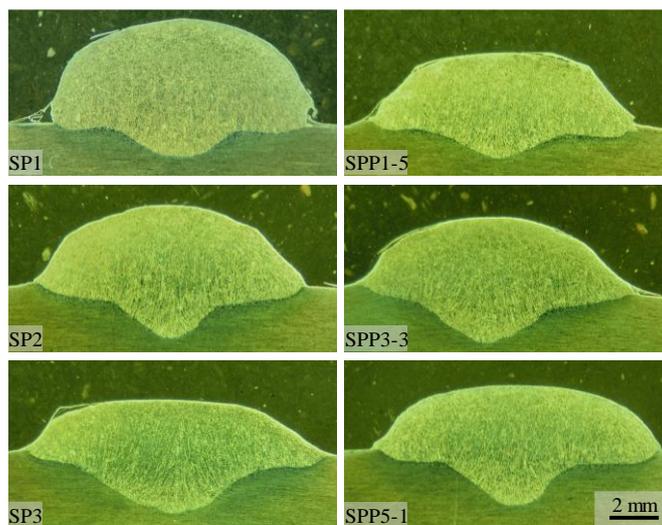


Figura 7 - Cortes transversales de cupones soldados

Tabla 3 - Geometría de los cordones soldados

Condición	Ancho (mm)	Penetración 1 (mm)	Sobreespesor (mm)	Dilución geométrica (%)	Altura variable (mm)
SP1	10,63	1,39	4,22	14,8	-
SP2	11,08	2,24	3,15	30,4	-
SP3	12,60	2,23	2,05	42,2	-
SPP1-5	11,18*	1,46*	2,81*	24,4*	3,70 – 4,84

<i>SPP3-3</i>	11,18*	2,31*	2,83*	35,3*	4,64 – 5,90
<i>SPP5-1</i>	11,63*	2,31*	2,49*	34,0*	5,68 – 4,84

\*: valores promedios de los ciclos calientes y fríos

De acuerdo a la Figura 7 y la Tabla 3, para los cordones soldados con simple pulso al aumentar la frecuencia de la corriente, tanto el ancho y la penetración aumentan, mientras que el sobreespesor (o altura) disminuyen. El calor aportado neto entregado por el proceso de soldadura está asociado a los parámetros eléctricos y a la velocidad de soldadura. Sin embargo, al aumentar la frecuencia de la corriente, la pileta líquida se hace más caliente. Esta mayor temperatura de la pileta disminuye la tensión superficial de la misma y provoca un cordón de soldadura más ancho y con mayor penetración, incluso aumentando la velocidad de soldadura. Esta mayor penetración genera una mayor dilución, situación no importante para soldaduras de junta a tope (ya que las características químicas y microestructurales de las chapas base y los consumibles son similares).

Por otro lado, para los cordones soldados con doble pulso, la geometría del cordón es dependiente del lugar donde se realice el corte transversal, debido a su perfil de penetración variable (para el ciclo caliente y frío). Es decir, las mediciones de las características geométricas del cordón soldado serán diferentes si el corte transversal se ubica en la etapa de soldadura del ciclo caliente o en la etapa de soldadura del ciclo frío. En este sentido, es que en la Tabla 3 se reportan los valores promedios (valores en \* de la Tabla 3) para GMAW-PP medidos sobre los cortes transversales. Para complementar esta caracterización se midió la altura máxima y mínima sobre los cortes longitudinales en los cupones soldados con doble pulso. Se puede observar que los anchos y sobreespesores promedios no fueron alterados al aumentar el tiempo del ciclo caliente (de 0,1 a 0,5 s). Sin embargo, se puede observar variaciones en la dilución y en la altura del metal aportado, asociados al tiempo del ciclo caliente y frío.

En cuanto a la geometría requerida para una pasada de raíz en juntas de chapas o cañerías se busca un cordón de soldadura ancho y de mayor penetración, situación alcanzada para las condiciones SP3 y SPP5-1 con simple y doble pulso respectivamente.

La Figura 8 muestra los cortes longitudinales de los cupones GMAW-PP. Se puede observar los valles y crestas asociados a los ciclos calientes y fríos, respectivamente. La frecuencia entre valles está asociada a los tiempos de los ciclos calientes. Las mediciones reales de las distancias entre valles del perfil de penetración, se correlacionan bastante bien con lo que se podría calcular utilizando la velocidad de soldadura y el tiempo del ciclo caliente.

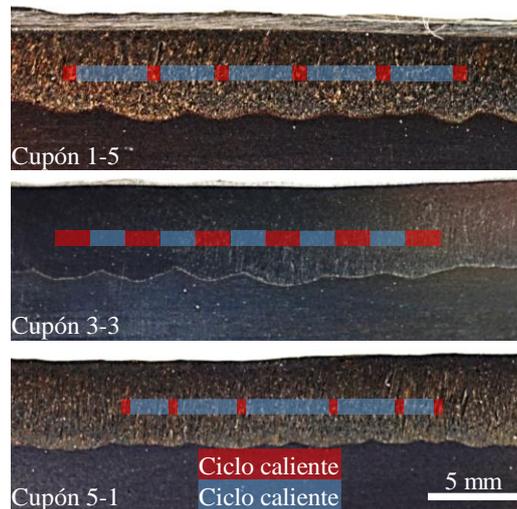


Figura 8 - Cortes longitudinales de los cupones GMAW-PP

La Figura 9, corresponde a los cortes transversales de todos los cordones de soldadura analizados.

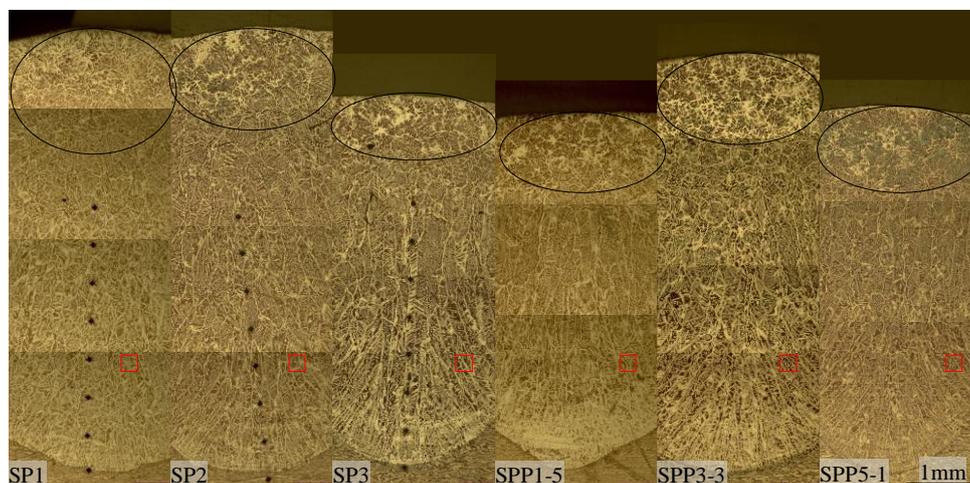


Figura 9 - Detalle de los granos columnares en cortes transversales

En la Figura anterior se puede observar la morfología de solidificación (nucleación y crecimiento) del metal de soldadura. A partir de la línea de fusión nuclean y crecen los diferentes granos columnares siguiendo la dirección de mayor extracción de calor. Dicha dirección genera la curvatura de los granos en la parte superior del cordón de soldadura. Es por este motivo que, en la parte superior de los cordones de los cortes transversales, se observa una morfología diferente de los granos columnares (crecen horizontalmente y alineados con el desplazamiento de la torcha). Dicha zona está identificada dentro del trazo negro de la Figura 9, donde se

puede apreciar un mayor contenido de austenita respecto al centro del metal de soldadura, asociado a la menor velocidad de enfriamiento (mayor tiempo de transformación de ferrita en austenita).

La Figura 10 muestra imágenes de microscopía óptica de los diferentes cupones. Dichas imágenes fueron extraídas de los recuadros rojos de la Figura 9. No se observaron diferencias entre las muestras, pero si se identificaron diferentes morfologías de austenita (austenita en borde de grano -  $\gamma_{BG}$ , dentro del grano -  $\gamma_{IG}$  y Widmanstatten -  $\gamma_W$ ) dentro de una matriz ferrítica.

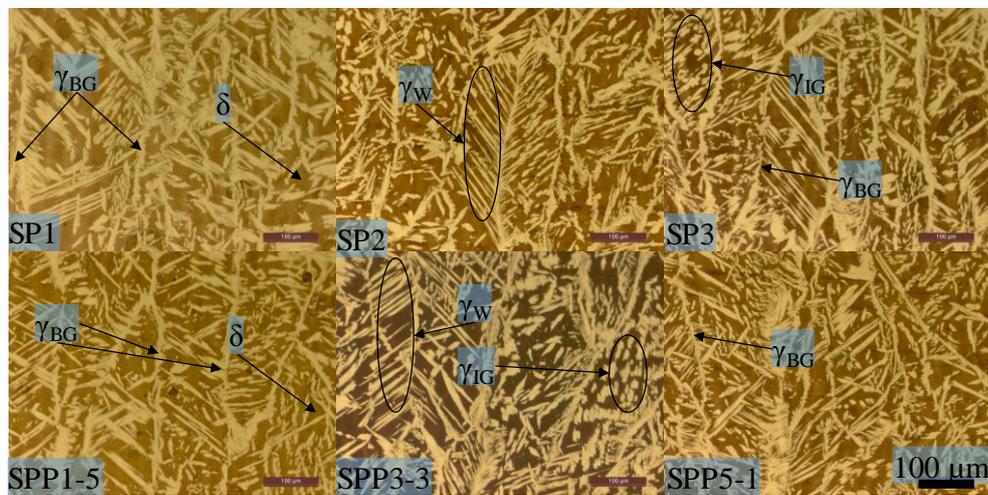


Figura 10 - Microscopía óptica de los cupones soldados

Una de las ventajas de la corriente pulsada es la de reducir el calor aportado y conducir a un refinamiento de grano. El tamaño de grano de austenita es reducido. Este fenómeno está asociado a que al aumentar la velocidad de enfriamiento se reduce el tiempo de difusión y, por lo tanto, se reduce el tamaño de grano final (Eghlimi, Shamanian & Raeissi, 2014).

De acuerdo a la secuencia de solidificación citada en la literatura (Lippold & kotecki, 2005) en los aceros inoxidable SDSS ( $L \rightarrow L + F \rightarrow F \rightarrow F + A$ ) puede observar varias morfologías de una austenita (A) en el metal de soldadura (austenita en borde de grano -  $\gamma_{BG}$ , dentro del grano -  $\gamma_{IG}$  y Widmanstatten -  $\gamma_W$ ). Si bien no se encontraron diferencias en cuanto a la cantidad de austenita total en la microestructura, se puede observar un mayor contenido de  $\gamma_W$ . Durante el enfriamiento, el tamaño del grano ferrítico juega un papel importante en el desarrollo de diferentes morfologías de la austenita. Si el tamaño de grano ferrítico es grande se generan mayores contenidos de  $\gamma_W$ . Por el contrario, si los granos de ferrita son finos se favorece la formación de  $\gamma_{IG}$ .

La Figura 11 muestra imágenes de microscopía electrónica de barrido de las condiciones SP1 y SPP5-1. En la misma se puede observar, al igual que bajo microscopía óptica, una matriz ferrítica y diferentes morfologías de austenita de las condiciones SP1. y SPP5-1. Sin embargo, en la muestra SPP5-1, en la zona afectada por el calor se puede observar, dentro de la matriz ferrítica una serie de precipitados que podrían estar asociados a nitruros.

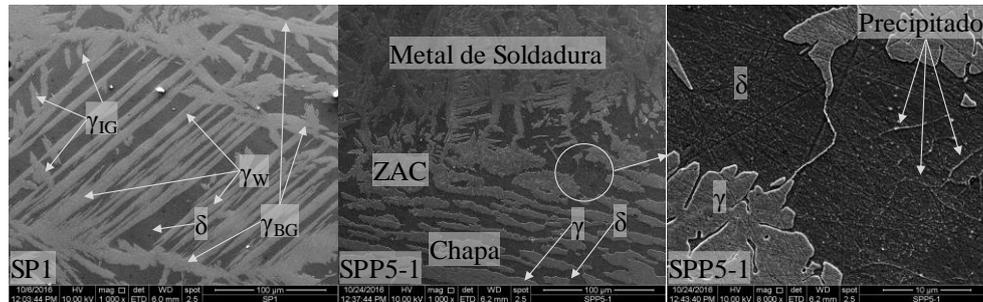


Figura 11 - Imágenes SEM en condiciones SP1 y SPP5-1

La Tabla 4 muestra los valores de ferrita y de dureza medidos por ferritómetro y análisis de imágenes en el metal de soldadura y en la zona afectada por el calor.

Tabla 4 - Cuantificación de ferrita (ferritómetro y análisis de imágenes) y dureza

Condición	Ferritómetro		Análisis de imágenes		Dureza en MS (HV1)
	MS	ZAC	MS	ZAC	
SP1	43	49	50	55	290
SP2	48	50	55	57	294
SP3	48	51	54	57	299
SPP1-5	47	46	53	50	290
SPP3-3	46	49	48	53	283
SPP5-1	44	45	56	59	288

En la Tabla 4 anterior se puede observar que la cuantificación microestructural (medida por ambas técnicas) arrojó valores similares y que no hubo variaciones para las diferentes condiciones de soldadura (de 48 a 56 % para el MS y de 50 a 59 % para la ZAC). Sin embargo, los contenidos de ferrita, determinado por análisis de imágenes, fueron levemente superiores a los determinados por ferritómetro (situación quizá alcanzada por la calibración del equipo). Además, el contenido de ferrita medido en la ZAC fue levemente superior a lo medido en el metal de soldadura. Esto está asociado al calentamiento y enfriamiento experimentado en la chapa base (Lippold & kotecki, 2005). En la misma Tabla se presentan los valores promedios de dureza medidos sobre el metal de soldadura. Dichos valores estuvieron comprendidos entre 283 y 299 HV1. En este sentido, se pudo observar que las pequeñas variaciones de los valores de dureza estuvieron asociadas a las pequeñas variaciones de ferrita en el metal de soldadura. La literatura (Zappa, Zalazar y Surian, 2017) comenta que la dureza en depósitos de soldadura de aceros inoxidable dúplex está relacionada con los contenidos de ferrita en la microestructura, ya que la ferrita posee una dureza superior. y que mayores contenidos de esta fase conllevan a una mayor dureza.

#### **4. Conclusiones**

Al aumentar la frecuencia (del simple pulso) y el tiempo del ciclo caliente y frío (en doble pulso) se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Las ondulaciones superficiales de los cordones disminuyen (los cordones son cada vez más lisos). Aumentan en ancho y la penetración de los mismos (condiciones necesarias para un cordón de pasada de raíz). No se observaron variaciones microestructurales. Sin embargo, se identificaron diferentes morfologías de austenita. Además, se pudo observar un mayor contenido de austenita *widmanstätten*. No hubo grandes variaciones en los contenidos de ferrita (determinados mediante ferritómetro y análisis de imágenes) ni en los valores de dureza medidos en metal de soldadura. Sin embargo, en la probeta soldada con mayor tiempo del ciclo caliente se observan precipitados en la zona afectada por el calor.

Dentro de los rangos estudiados, se puede concluir que no hubo efectos microestructurales significativos al aumentar la frecuencia y el tiempo del ciclo caliente. Sin embargo, se pudo observar una fuerte dependencia de la geometría del cordón con dichos parámetros. Es decir, se puede controlar la geometría del cordón (sobre todo en pasadas de raíz) sin modificar el calor aportado.

#### **5. Agradecimientos**

Los autores del presente trabajo desean agradecer a CONARCO-ESAB por la provisión del equipo de soldadura semiautomático Aristo Mig 500i. A Mercedes Pianetti del INTI-Mecánica por las imágenes SEM.

#### **6. Referencias**

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*, 2011. 78((169)): p. 206-215.

Chehuan, T., et al., Influence of multipass pulsed gas metal arc welding on corrosion behaviour of a duplex stainless steel. *Corrosion Science*, 2014. 86: p. 268–274.

Eghlimi, A., M. Shamanian, and K. Raeissi, Effect of current type on microstructure and corrosion resistance of super duplex stainless steel cladding produced by the gas tungsten arc welding process. *Surface & Coatings Technology*, 2014. 244: p. 45-51.

Lippold, J.C. and D.J. Kotecki, *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Wiley-Interscience ed, ed. e. Ed. 2005, USA. 357 p.

Madadi, F., F. Ashrafizadeh, and M. Shamanian, Optimization of pulsed TIG cladding process of stellite alloy on carbon steel using RSM. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012. 510: p. 71–77.

Porta, C., et al., Soldadura de un acero inoxidable dúplex 2205 por GMAW mediante el uso de la técnica de arco pulsado. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 2003. 23(1): p. 21-26.

BÖHLER, Technical Information: BÖHLER CN 25/9 CuT-IG. GMAW solid wire, high alloyed, highly corrosion resistant, 2010.

Angelini, E., B.D. Benedetti, and F. Rosalbino, Microstructural evolution and localized corrosion resistance of an aged superduplex stainless steel. *Corrosion Science*, 2004. 46: p. 1351-1367.

Zappa, S., M. Zalazar, and E. Surian, Efecto de la Composición Química del Metal de Aporte y del Calor Aportado Sobre la Microestructura y las Propiedades Mecánicas de Juntas Soldadas de Aceros Inoxidables Dúplex. *Soldagem & Inspeção*, 2017. 22(2): p. 116-128.