

DESARROLLO DE PROCESOS DE SOLDADURA FSW PARA LANZADORES

BIDINOST, Pablo¹ ; ACHIERNO, Ezequiel²; OJER, Rubén³

¹ Gestión de Proyectos, Acceso Al Espacio, VENG SA – pbidinost@veng.com.ar

² Referente de operación FSW, Fabricaciones CEPI, VENG SA – eachierno@veng.com.ar

³ Control de Calidad, Departamento de Calidad, VENG SA – rojer@veng.com.ar

INTRODUCCIÓN

Friction Stir Welding es un método de soldadura en estado sólido desarrollada por The Welding Institute en la década de los '90, el cual permite la obtención de una mayor eficiencia de junta respecto a la soldadura por fusión en ciertos materiales, como las aleaciones de aluminio. Esta ventaja hizo que, con el correr de los años y la apertura de estas tecnologías, su uso se haga extensivo en la industria espacial; específicamente su aplicación en vehículos lanzadores. Actualmente, VENG cuenta con un centro de soldadura por fricción, único a nivel regional, para el desarrollo y producción de vehículos lanzadores.

La empresa VENG posee un compromiso contractual con la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) por el desarrollo, a través de su gerencia de Vehículos Espaciales, de un conjunto de lanzadores.

Se considera a la soldadura por FSW como una de las tecnologías habilitantes para el acceso al espacio. La implementación de esta tecnología permitirá una reducción de espesores de las estructuras primarias, respecto a otras tecnologías de unión. Por lo tanto, se asegurará el cumplimiento de requerimientos de masa seca e índice estructural de los lanzadores para asegurar el cumplimiento de la misión.

Actualmente, VENG es la única empresa de la región que cuenta con la capacidad de desarrollar procesos de FSW end-to-end a nivel productivo, gracias a su Centro de FSW e instalaciones de ensayo.

1. MARCO DE TRABAJO

1.1. Programa ISCU

Actualmente, el Programa ISCU prevé el desarrollo, fabricación y lanzamiento de 3 tipos de lanzadores de complejidad incremental, denominados TII-70, TII-150 y TII-250, respectivamente. Ninguno de ellos reutilizable. El TII-250 será el vehículo para inyectar carga útil en órbita y brindar servicios de acceso al espacio.

El primer, lanzador de 0,7m de diámetro, denominado TII-70, posee como objetivo principal el ensayo en vuelo del motor de segunda etapa del TII-250. Se proyecta el lanzamiento de 4 unidades de este vehículo entre 2026 y 2028.

El segundo lanzador en el programa, el TII-150 de 1,5m de diámetro, posee como objetivo principal el ensayo en vuelo del motor de primera etapa del TII-250. Se proyecta el lanzamiento de 2 unidades de este vehículo entre 2029 y 2030.

El tercer lanzador en el programa, el TII-250 de 2,5m de diámetro, posee como objetivo la inyección de cargas útiles de entre 500Kg y 750Kg a unos 600Km. Se proyecta el primer lanzamiento para 2030. Este vehículo es el objetivo final del programa y será operado por VENG para la venta de servicios de lanzamiento.



Figura 1. Lanzador TII-250.

1.2. Proyecto de tanques estructurales FSW

VENG posee el rol de contratista principal en el desarrollo del Programa ISCU. Los trabajos se ejecutan a través distintos proyectos incluidos en contratos bianuales. Cada proyecto posee como objetivo el desarrollo de un sistema, subsistema o producto específico y, en conjunto, permiten cumplir con el programa.

Los desarrollas en materia de soldadura por fricción se encuentran incluidos en el proyecto de Fabricación de tanques estructurales prototipo de 2500mm de diámetro nominal, en aluminio, soldado por FSW. Este proyecto posee una duración de 2 años de línea base y unas 56.000 horas hombre de trabajo.

El mismo tiene como objetivo la definición y puesta en marcha de las diferentes rutas asociadas al diseño, fabricación, operación y aceptación de un componente de vuelo primario soldado por FSW. El proyecto se encuentra principalmente enfocado en la organización de la producción e implementación de los procesos de aseguramiento de la calidad durante todo el ciclo de vida del producto. En este recorrido, a su vez, se busca el desarrollo a nivel operativo para la óptima ejecución de las tareas involucradas de cara a la fabricación del vehículo lanzador por FSW.

La correcta conclusión del proyecto permitirá validar la factibilidad de fabricación, inspección y aceptación de un elemento de vuelo con la tecnología instalada.



Figura 2. Objetivos de proyecto.

2. CARACTERÍSTICAS Y REQUERIMIENTOS DE LOS PROTOTIPOS

En un vehículo lanzador, los tanques estructurales tienen dos funciones principales, que derivan luego en los requerimientos del componente. La primera es contener a los propelentes presurizados. En este caso se trata de kerosene (KER) y oxígeno líquido (LOx). Este último condiciona al componente exponiéndolo a un ambiente criogénico el cual solicita térmicamente a la estructura. Otra de sus funciones principales es transmitir las cargas mecánicas que el vehículo experimenta durante la operación y el vuelo, las cuales tienden a solicitar la estructura bajo una combinatoria de momentos, carga axial y corte. Por último, otra característica básica de cualquier componente estructural de vuelo es la minimización de su peso; esto resulta necesario para lograr índices de masa que permitan cumplir la misión del vehículo lanzador.

Este diseño en particular se encuentra conformado por dos envueltas, una superior y otra inferior, con el objetivo de contener todos los tipos de soldadura de un tanque de mayor tamaño a un mínimo volumen, minimizando la utilización de materia prima. Esto resulta en un prototipo 2500mm de diámetro y 2000mm de longitud. Ver Figura 3.

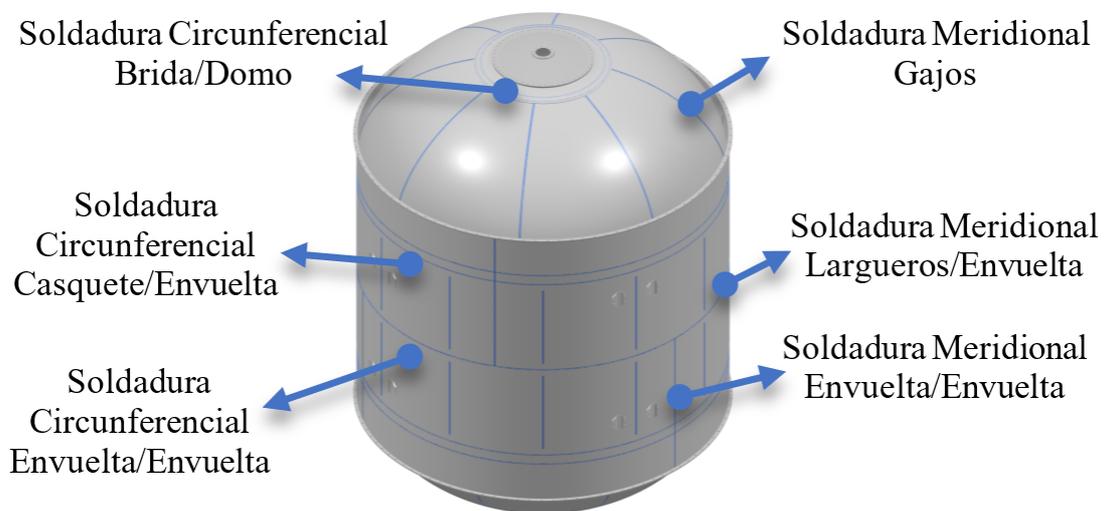


Figura 3. Soldaduras en tanque estructural.

En cuanto al material, se optó por la aleación de aluminio AA2219 (aluminio-cobre), de uso extensivo en vehículos espaciales. Las principales características de este material son alta resistencia específica, alta resistencia a la corrosión bajo tensión (Stress Corrosion Cracking) y buena tenacidad a la fractura. Tradicionalmente, esta aleación no se considera soldable, aunque es posible soldarla por fusión conviviendo con una degradación considerable de sus propiedades. Sin embargo, esta aleación posee un comportamiento muy distinto al soldarla por FSW.

3. FSW COMO SOLUCIÓN TECNOLÓGICA

Friction Stir Welding es un método de soldadura en estado sólido mediante una herramienta rotante, que permite generar calor por fricción y batido del material calentado en estado visco-plástico.

Esta técnica fue desarrollada por The Welding Institute (Reino Unido) en la década de los '90, la cual permite la obtención de una mayor eficiencia de junta respecto a la soldadura por fusión en ciertos materiales, como las aleaciones de aluminio. Esta ventaja hizo que, con el correr de los años y la apertura de estas tecnologías, su uso se haga extensivo en la industria espacial; específicamente su aplicación en vehículos lanzadores.

Se seleccionó estratégicamente, como proceso de fabricación primario, la soldadura por fricción, debido al potencial de lograr eficiencias de junta superiores al 70% (valores típicos de fusión), permitiendo la reducción del peso de los vehículos. Por otro lado, el proceso calificado resulta robusto,

repetible y automatizable; sin la necesidad de la utilización de consumibles y un menor entrenamiento del operador respecto de la soldadura por fusión (robotizada o automática).

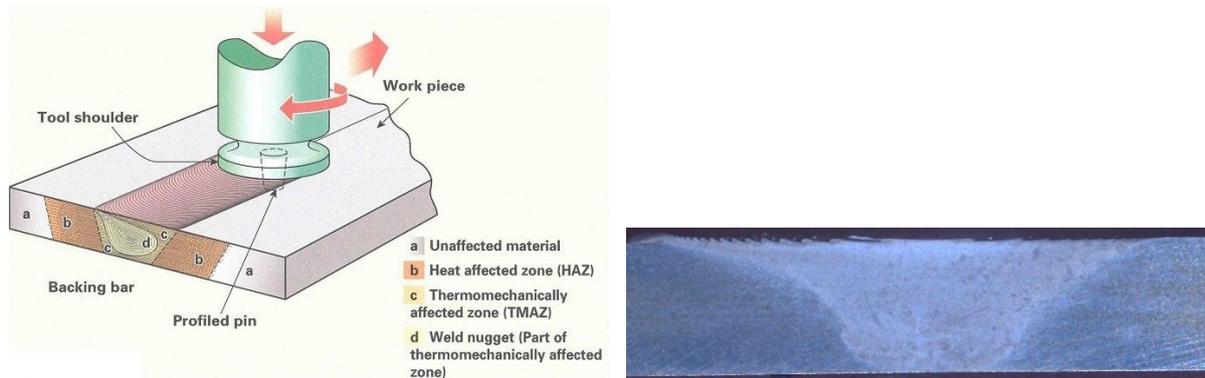


Figura 4. Esquema cordón de soldadura FSW [TWI Global] e imagen metalográfica.

4. EQUIPO DE FRICTION STIR WELDING

El centro de Friction Stir Welding instalado en el Centro Espacial Punta Indio, operado por VENG, está conformado por una torre que contiene al cabezal de soldadura y 3 estaciones dedicadas a la soldadura de distintas partes con geometrías particulares. La torre se desplaza para acceder a cada una de las estaciones y realizar soldaduras de distintos componentes en cada una de ellas. El centro posee un control numérico SIEMENS a partir del cual se comanda tanto la torre, con el cabezal de soldadura, como las 3 estaciones dedicadas.

Cada una de las estaciones posee herramental dedicado para partes específicas de los tanques. Actualmente, todo el herramental se encuentra configurado para la producción de tanques de 2500mm de diámetro y casquetes semielípticos. Sin embargo, por sus características, posee la capacidad de alojar estructuras de 1500mm a 3000mm de diámetro modificando el herramental.

El centro está dotado de rutinas de control de soldaduras por posición y por fuerza, a través de encoders y celdas de carga, respectivamente. Esto permite lograr soldaduras con carga constante a lo largo de su extensión, asegurando un aporte de calor homogéneo en toda la longitud de soldadura. Esta estrategia de control permite, a su vez, compensar ciertas desviaciones geométricas de las juntas a soldar.

La soldadora puede desarrollar hasta 52kN de fuerza axial y el husillo puede rotar hasta 2.000RPM, permitiendo la soldadura de aleaciones de aluminio entre 2,4mm y 12,7mm de espesor total. Puede desarrollar velocidades de desplazamiento de herramienta de hasta 1200mm/min.



Figura 5. Instalación Centro de Soldadura por Fricción – Centro Espacial Punta Indio.

DWT	Casquetes en gajos y bridas
VWT	Secciones cilíndricas y largueros
CWT	Cilindros y casquetes
WT	Cabezal de soldadura

Figura 6. Función de estaciones del Centro de FSW de VENG.

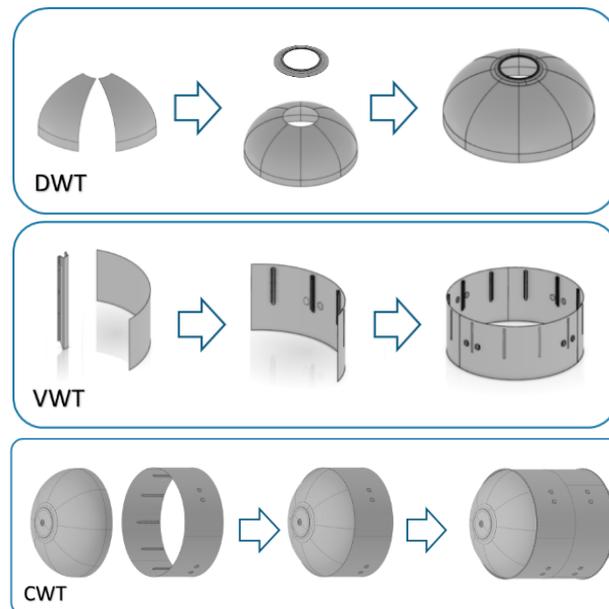


Figura 7. Esquema de soldaduras por estación.

La operación se realiza a través de un panel de control principal estándar, pero a través de una interfaz visual dedicada para cada una de las soldaduras. Por lo que no es necesario programar convencionalmente cada una de las rutinas, sino que los programas se encuentran definidos y, a través de la interfaz visual, se seleccionan los parámetros de soldadura necesarios. El equipo se encuentra dotado de un control portátil que permite al operador monitorear la soldadura y realizar pequeñas correcciones en tiempo real; particularmente útil en etapa de desarrollo de procesos.



Figura 8. Estación de soldadura vertical (VWT) con una envuelta completa recién soldada.



Figura 9. Estación de soldadura circunferencial (CWT) en proceso de armado de junta.



Figura 10. Estación de soldadura de domos (DWT) con un domo recién soldado.

El centro está dotado con una serie de herramientas para el rango de espesores mencionado. Las mismas están compuestas por 2 partes: el pin, encargado del batido del material y el shoulder, encargado del aporte de calor por fricción. El sistema cuenta con la posibilidad de realizar retracción de pin, permitiendo eliminar el defecto de salida típico de FSW (keyhole defect).

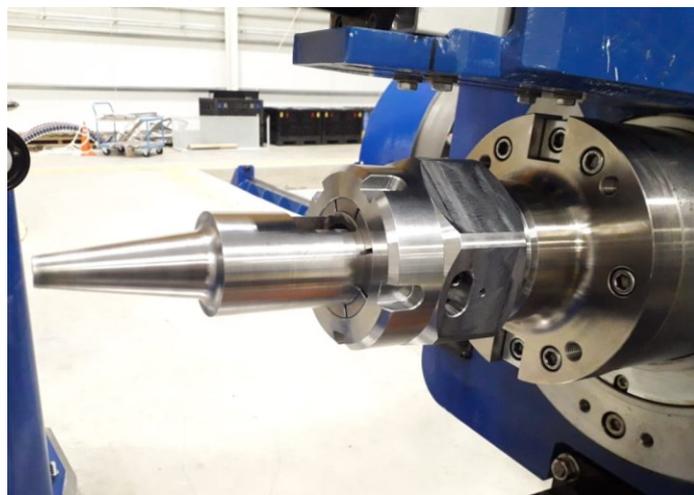


Figura 11. Cabezal de soldadura centro de FSW.

5. DESARROLLO DE PROCESOS DE SOLDADURA FSW

El desarrollo de procesos de soldadura se realiza completamente in-house, aprovechando las instalaciones de VENG, las cuales cuentan con capacidades de producción de cupones, producción de algunos componentes, ensayos metalográficos, ensayos de caracterización de materiales y ensayos no destructivos. De esta manera, se logra feedback ágil entre la soldadura y sus resultados en calidad y performance. Lo que permite una rápida iteración con canales de comunicación abreviados.

El desarrollo de soldaduras FSW está concebido como un proceso iterativo entre conjunto de parámetros de entrada y calidad de los cordones producidos. Se determina un conjunto de parámetros de partida y un plan de soldadura y ensayo. En base a los resultados obtenidos en cada iteración se modifica la estrategia de forma de optimizar y agilizar el proceso.

El tanque cuenta con 6 configuraciones de junta distintas, en cada una de las cuales deberán aplicarse procesos específicos. Por lo que cada uno de ellos deberá ser desarrollado y calificado para su posterior implementación. El prototipo posee un total de 56 cordones de soldadura, tanto a tope como solapados. De aquí el peso de los procesos de soldadura y el aseguramiento de calidad en este proyecto.

Tabla 1. Configuraciones de junta.

#	Configuración	Espesor	Material A	Material B
1	TOPE	3,2mm	Al 2219-T81	Al 2219-T81
2	LAP	5,6mm	Al 2219-T81	Al 2219-T62
3	TOPE	3,2mm	Al 2219-T81	Al 2219-T81
4	TOPE	3mm	Al 2219-T62	Al 2219-T62
5	LAP	6,2mm	Al 2219-T62	Al 2219-T81
6	LAP	6,4mm	Al 2219-T62	Al 2219-T81

1. Soldadura entre secciones roladas reforzadas para conformar cilindros reforzados. VWT
2. Soldadura de largueros (refuerzos longitudinales) en paneles rolados para generar secciones reforzadas. VWT
3. Soldadura de cierre entre cilindros reforzados. CWT
4. Soldadura entre gajos para generar domos. DWT
5. Soldadura de bridas sobre domos para generar casquetes. DWT
6. Soldadura entre casquetes y cilindros para cierre del tanque. CWT

5.1. Enfoque de desarrollo

El objetivo del desarrollo es la obtención de cordones sanos (libres de defectos) con una resistencia (eficiencia de junta) determinada. Una vez cumplidas estas condiciones, se procede a calificar estas soldaduras y a los operadores de máquina según el marco normativo, a través del organismo de certificación (Instituto Argentino de Siderurgia). De esta manera, la etapa de desarrollo permitirá obtener parámetros de soldadura y procedimientos básicos (como armado de junta, limpieza, manipulación, etc.).

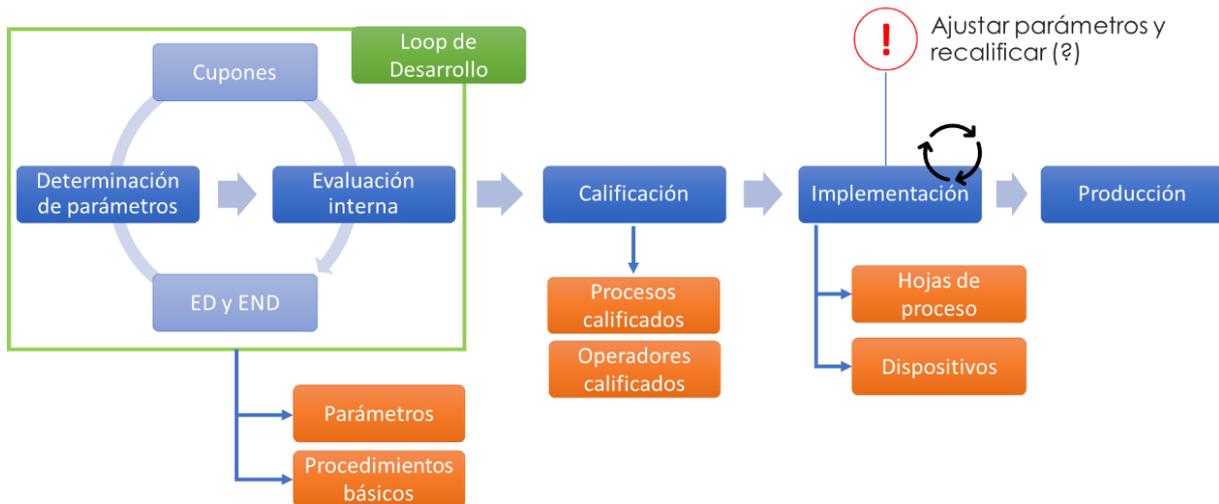


Figura 12. Enfoque de desarrollo.

La etapa de calificación permite lograr la calificación de procesos y operadores según norma, a través del ente certificador. Esto implica que el proceso ha logrado un nivel de calidad y performance mínimo, repetible por operadores con la habilidad adecuada. El principal documento de salida es la EPS o WPS por sus siglas en inglés.

Las soldaduras bajo procedimiento calificado pasarán a una etapa de implementación. Esto implica la aplicación de los procedimientos sobre elementos estructurales del tanque, utilizando los dispositivos y procedimientos subsidiarios necesarios en etapa de producción. La etapa de implementación permite probar el desempeño de los procedimientos de soldadura en componentes del producto final, en combinación con los dispositivos dedicados y procedimientos subsidiarios específicos. De esta manera, se obtendrán las hojas de proceso (instrucciones) para la fabricación de los distintos componentes soldados y configuración final de dispositivos para producción. Es posible que, durante esta etapa, sea necesario ajustar ligeramente los procesos de soldadura y esto demande una recalificación de estos.

Concluidas estas etapas, se pasa a la producción del tanque prototipo bajo hojas de proceso (instrucciones) congeladas, procedimientos de soldadura calificados (EPS) y operadores calificados; utilizando los dispositivos específicos que correspondan a cada componente y procedimientos subsidiarios probados.

5.2. Marco normativo

Se seleccionó la norma AWS D17.3/D17.3M Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Applications como marco normativo para el desarrollo de soldaduras. Se clasificaron todas las soldaduras del prototipo como Clase A, aplicando el mayor nivel de exigencia respecto a los criterios de aceptación de la norma.

El marco normativo contiene los requerimientos mínimos y lineamientos para la calificación de procesos de soldadura, calificación de operadores y técnicas de inspección con sus respectivos criterios de aceptación en función de la clase de soldadura evaluada (A, B y C).

Otras normas aplicadas durante el desarrollo de procesos de soldadura:

- AMS 2770 Heat Treatment of Wrought Aluminum Alloy Parts
- AMS 2658 Hardness and Conductivity Inspection of Wrought Aluminum Alloy Parts
- ASTM E8 Tension Testing of Metallic Materials
- ASTM E3 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens

5.3. Estrategia de trabajo

La obtención de soldaduras libres de defectos, resistentes y aplicables a producción de estructuras aeroespaciales demanda trabajar con múltiples variables y capturar la combinación que cumple con estas condiciones. Si bien es posible determinar el valor de un conjunto de variables de partida de forma teórica o a través de análisis de información preexistente, es necesario obtener la combinación de todas aquellas que poseen una influencia directa en la calidad y performance (definidas como esenciales en la norma AWS).

Esto, sin dudas, dispara la necesidad de un punto de partida definido y rangos concretos de evaluación de parámetros, el cual deberá ir ajustándose con una estrategia clara, conforme avance el desarrollo, para asegurar la convergencia a una combinación de conjunto de parámetros que permitan soldar las estructuras. Para la evaluación de parámetros son necesarias pruebas, las cuales arrojan resultados que permiten ajustar los rangos de parámetros.

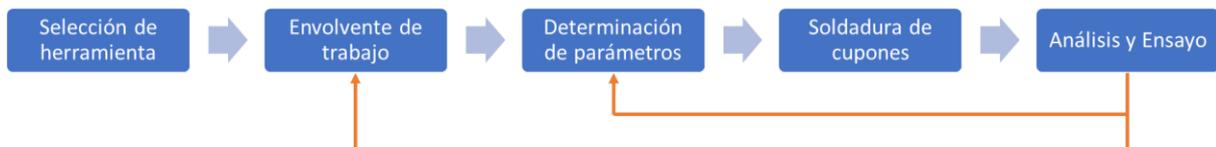


Figura 13. Estrategia de análisis de procesos.

5.3.1. Herramientas

El centro de soldadura por FSW, instalado en el Centro Espacial Punta Indio y operado por VENG, cuenta con una serie de herramientas para cubrir distintos rangos de espesores de junta de aleaciones de aluminio. Este es un punto de partida concreto para el desarrollo de parámetros, teniendo en cuenta que el diseño se encuentra definido (Figura 3) y, por lo tanto, las configuraciones de junta (Tabla 1) y operaciones de soldadura (Figura 7) también.

La geometría y configuración de herramienta resulta una variable esencial del proceso de soldadura según AWS. De hecho, hemos comprobado que una pequeña modificación geométrica en la herramienta genera un gran cambio en los parámetros de proceso. Un cambio de configuración llevará a una modificación completa de los parámetros y hasta de la estrategia de soldadura.

Las herramientas que posee VENG, se constituyen de 2 partes: shoulder y pin (ver Figura 14). La primera es la parte encargada principalmente del aporte de calor por fricción, a través del íntimo contacto con la superficie de la chapa y aplicación de carga mientras rota vinculada al husillo. En nuestro caso, son cónicas con punta plana y lisa. La segunda es la que define el flujo del material calentado en estado visco-plástico. Esta rota solidaria al shoulder y debe encontrarse en todo momento dentro del material de la junta. En nuestro caso son troncocónicas roscadas.



Figura 14. Shoulders (izq.) y Pines (der.).

El conjunto de herramientas se encuentra en 2 partes ya que el pin puede moverse dentro del shoulder comandado por un eje CNC. Esto permite elegir la longitud de pin a utilizar con una misma configuración de herramientas y soldar con retracción de pin. Esto es especialmente útil en soldaduras a tope que poseen una condición de estanqueidad y no puede permitirse la presencia del defecto característico de salida (keyhole defect), ver Figura 15.

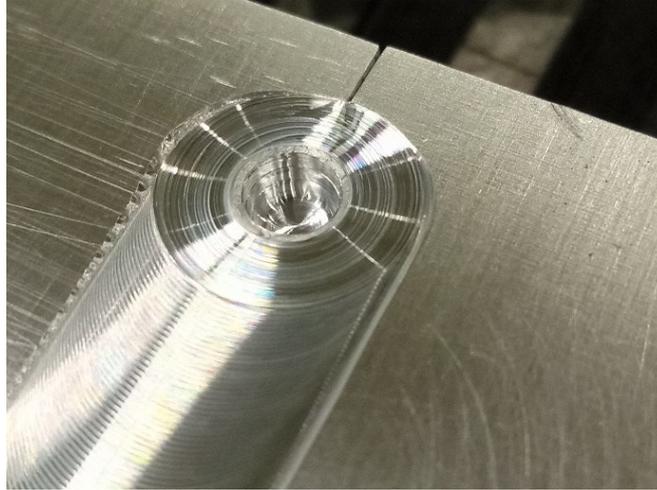


Figura 15. Keyhole defect.

Este conjunto de herramientas posee relaciones geométricas determinadas y, cada conjunto, otorgará soldaduras libres de defectos bajo un conjunto de parámetros distintos. Por lo que se generaron envolventes de trabajo teóricas para cada conjunto como punto de partida.

VENG posee su propio diseño de herramientas basado en las provistas originalmente, las cuales son fabricadas por proveedores nacionales o bien producidas in-house. Se utiliza acero H13 para las de prueba y se poseen distintas líneas probadas para producción: acero pulvimetalúrgico S390 de la firma Böhler, S705 de la misma firma y una aleación de Cobalto-Níquel (original).

5.3.2. Determinación de parámetros

En función de la junta en desarrollo (ver Tabla 1), se utiliza un conjunto de herramientas. Estas poseen una ventana de parámetros de trabajo óptimos desconocidos. Por lo que se plantea una envolvente de trabajo teórica inicial, considerando al pin como una herramienta de corte estándar; que, en función del material de la junta posee un rango de velocidades tangenciales de corte aceptables.

Este rango de velocidades tangenciales de corte es compatible con un rango de velocidades de avance. Por lo que, a través del diámetro medio del pin, se puede obtener un rango de velocidades de rotación y avance de la herramienta.

Graficando los límites de la relación velocidad de rotación -vs- velocidad de avance, se obtiene la gráfica de una envolvente aceptable de trabajo, si el conjunto de herramientas fueran herramientas de corte estándar.



Figura 16. Envolvente de trabajo de partida.

A partir de esta envolvente de trabajo en el plano velocidad de rotación (w)-velocidad de avance (f), se realizan pruebas de soldadura en puntos característicos de la envolvente y se evalúan los siguientes aspectos:

- Aspecto visual de la soldadura (superior y raíz en el caso de tope).
- Estabilidad de la carga de proceso (control automático).
- Diferencia entre pico de carga al ingreso del material y carga durante soldadura (control automático).

El objetivo de estas primeras pruebas es obtener una relación f/w que otorgue un perfil de carga estable a lo largo de la soldadura. Esta primera evaluación también permite estimar un rango de carga aproximado para cada relación f/w probada.

Las pruebas de soldadura para desarrollo de parámetros se realizan sobre cupones del mismo material y estado térmico que la junta a soldar en el componente (ver Tabla 1). Esto se debe a que serán necesarias múltiples soldaduras para lograr estabilizar los parámetros y obtener soldaduras conformes a la norma de referencia (AWS D17.3), por lo que no resulta eficiente, desde un punto de vista de tiempo y costos, realizarlo sobre componentes de vuelo o del prototipo.

Probados los puntos característicos de la envolvente y habiendo conseguido un rango de carga para la configuración de junta a soldar, se sueldan nuevos cupones probando distintos valores de carga (F) para las relaciones f/w más estables y de aspecto visual adecuado. En esta instancia, se busca lograr un proceso 100% automático bajo control por carga y con carga homogénea. Esto quiere decir que la medición de carga del equipo determinará la profundidad de la herramienta para lograr soldaduras de penetración adecuada (total en el caso de tope y a un porcentaje de profundidad para solapadas).

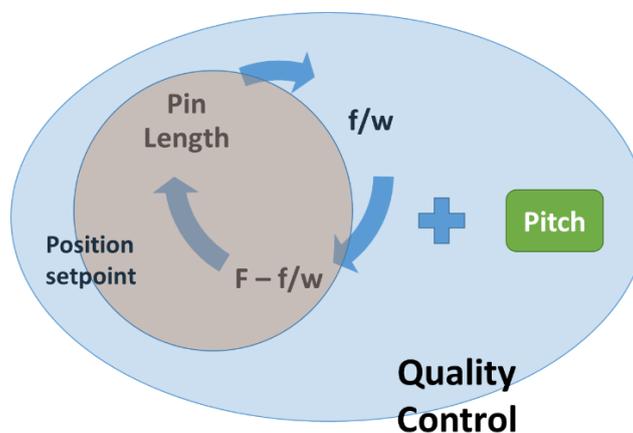


Figura 17. Esquema del loop de determinación de parámetros.

En los cupones donde se busca una relación de F -vs- f/w, se realizan inspecciones de líquidos penetrantes, en el caso de juntas a tope; y metalografías en todas las configuraciones de junta. Esto permite definir si la morfología del nugget es la adecuada y detectar la presencia de defectos.

Una vez encontrados valores de f/w y carga (F) que permitan una soldadura 100% automática con carga homogénea, se ajusta la longitud de herramienta para lograr la profundidad necesaria y se define el límite del rango de desplazamiento producto del control por fuerza. Esto es necesario para evitar penetración excesiva tanto en juntas a tope como solapadas.

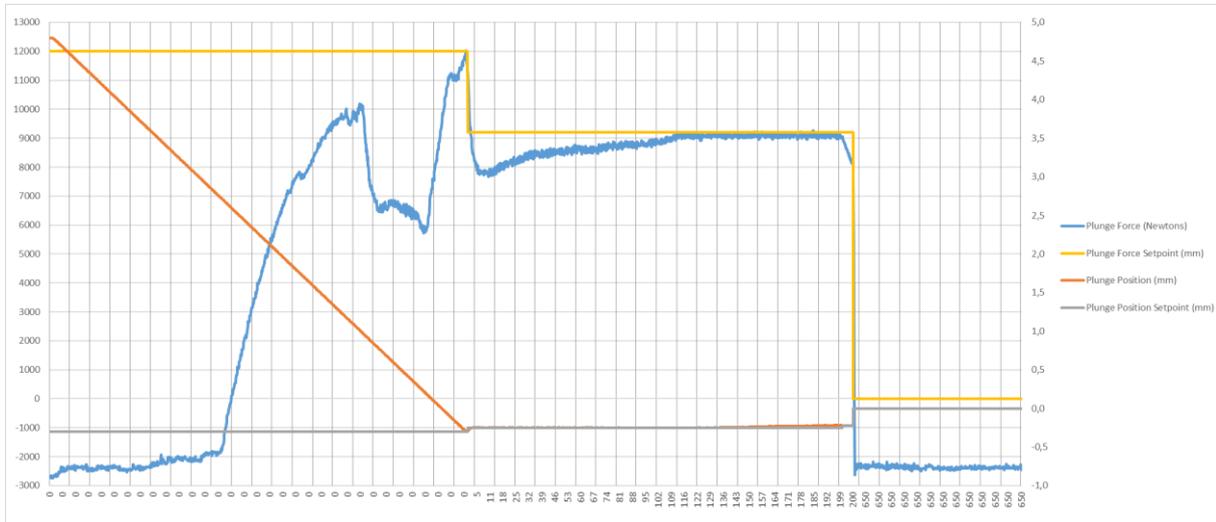


Figura 18. Perfil de carga no homogénea (azul) en soldadura a tope en 3.2mm de espesor.

Esta secuencia descrita es el camino lógico que se adopta a grandes rasgos. Cada vez que se avanza en el loop, es necesario realizar pequeñas correcciones sobre los parámetros que se encontraban definidos para mantener la soldadura saludable. Recordemos la Figura 13, donde se observa que cada ensayo de calidad (quality control en la Figura 17) genera una realimentación en los parámetros y envolvente de trabajo.

Por último, se busca maximizar la resistencia de las soldaduras libres de defectos, tal que la eficiencia de junta esté por encima del 70% para juntas a tope y por encima del 60% para juntas solapadas; que son los valores mínimos del estándar tomado como marco normativo. La eficiencia de junta se define como el cociente entre la tensión de rotura obtenida por ensayo de tracción de probetas de soldadura normalizadas y la resistencia a rotura del material de base.

$$e = \frac{\sigma_{ensayo}}{\sigma_r} \geq \begin{cases} 0,7 & \text{juntas a tope} \\ 0,6 & \text{juntas solapadas} \end{cases}$$

5.3.3. Ensayos

A continuación, se incluye una breve descripción de los ensayos realizados habitualmente en el desarrollo de soldaduras FSW:

- Inspección visual: permite evaluar sanidad de la raíz y defectos abiertos a la superficie detectables a ojo desnudo. Por ejemplo, faltas de penetración y/o porosidad excesiva en raíz, cavidades abiertas a la superficie y flash.
- Líquidos penetrantes: no exigido por la norma, pero de gran utilidad para la detección práctica de falta de penetración y porosidad en raíz de soldaduras a tope.

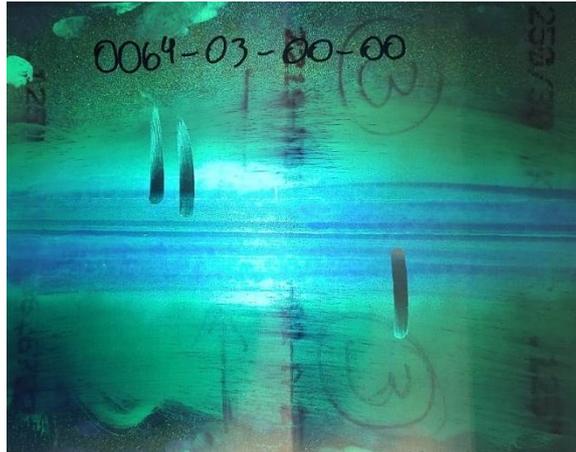


Figura 19. Inspección por líquidos penetrantes en raíz de junta a tope – espesor total 3.2mm en Al2219-T81.

- Micro/macrografías: ensayo exigido por norma para calificación de soldaduras. Permite detectar y dimensionar faltas de penetración en soldaduras a tope, morfología de nugget, estructura cristalina y cavidades subsuperficiales aisladas (poros) o continuas (wormholes); hook defect, cold lap y fisuras en soldaduras solapadas.

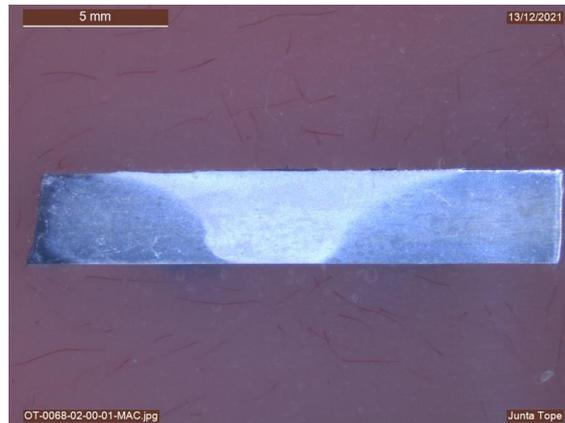


Figura 20. Macrografía de junta a tope libre de defectos – espesor total 3.2mm en Al2219-T81.

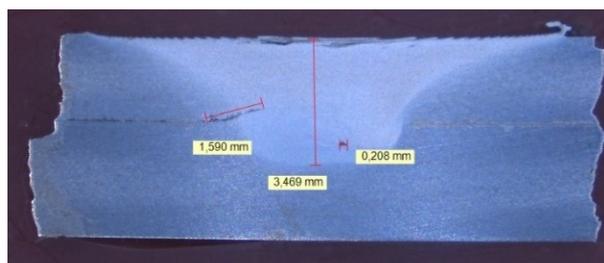


Figura 21. Macrografía de junta solapada con defectología característica – espesor total 5,6mm en Al2219.

- Ensayos de tracción: ensayo exigido por la norma para calificación de soldaduras. Permiten determinar la performance de las uniones soldadas mediante la comparación de la tensión de rotura de probetas soldadas, respecto a la resistencia del material base. La norma indica una eficiencia de junta mínima para la calificación de soldaduras.



Figura 22. Ensayo de tracción en probeta de junta solapada – espesor total 5.6mm en Al2219-T81/T62.

- Inspección volumétrica: exigido por la norma para inspección de soldaduras. Permite la determinación de sanidad de los cordones mediante la detección y dimensionado de indicaciones. Se utilizará para la inspección de productos soldados bajo proceso calificado.

6. RESULTADOS

La estrategia de desarrollo lleva, de manera eficiente, a la calificación de soldaduras de forma iterativa. Se implementaron los procedimientos de soldadura, con el nivel de madurez alcanzado a Mayo de 2023, para la fabricación y ensayo de un primer mínimo producto viable (MVP) para demostrar las capacidades desarrolladas y evaluar, de forma temprana, las necesidades e implicancias de la producción de tanques, esto es: robustez de los procedimientos subsidiarios, funcionalidad de dispositivos, formación de los recursos, maniobras de izaje y traslados, instalación y operación de banco de ensayos hidráulicos.



Figura 23. Primer tanque prototipo (MVP)

7. DESAFÍOS Y TRABAJOS FUTUROS

- Calificación juntas solapadas Brida-Domo, Casquete-Cilindro.
- Calificación junta a tope de cierre Cilindro-Cilindro.
- Desarrollo de procedimiento de inspección por Rx en productos soldados FSW.
- Evaluación retrospectiva conjunta entre base de datos de parámetros y ensayos para optimización de procesos.
- Mejora en diseño de herramienta para juntas solapadas.
- Desarrollo de proveedores de herramientas con “aleaciones de alta performance”.
- Fabricación y ensayo del prototipo final.

CONCLUSIONES

- Es importante invertir recursos en el desarrollo y mejora de los subprocesos involucrados en la producción de partes a soldar. La calidad de estos subcomponentes y elementos estructurales afectará el armado de la junta y, nuevamente, esto impacta en calidad y performance de los cordones.
- Mediante la utilización de una estrategia de desarrollo consistente y robusta se lograron obtener soldaduras libres de defectos en condiciones de calificación.
- La estrategia de desarrollo demostró un rápido avance en la curva de aprendizaje. El desarrollo de la primera soldadura demandó la ejecución de más de 100 cupones, mientras que la última soldadura desarrollada demandó únicamente 8 cupones. En el caso de soldaduras complejas, se pudo realizar la implementación en paralelo con el desarrollo de los cordones.
- La geometría de la herramienta es uno de los factores críticos en la calidad y repetitividad de las soldaduras.
- Se verifica la importancia de poseer herramientas de aleaciones adecuadas para la sollicitación del proceso, resistentes al desgaste y revenido.
- Es fundamental la inversión en proveedores de herramientas nacionales calificados y el desarrollo de una línea de reposición de herramientas in-house.
- La vinculación estratégica con la autoridad nacional y entes de calificación autorizados es fundamental para la definición de estrategias de ensayo para calificación de estructuras geoméricamente complejas.
- Contar con un equipo de desarrollo multidisciplinario y capacidades de inspección y ensayo en planta otorgaron agilidad al desarrollo e iteración entre procesos.
- La soldadura por FSW es considerada, por la empresa, como una de las tecnologías habilitantes para el acceso al espacio, ya que ha demostrado ser fundamental para la reducción de peso en los componentes estructurales primarios. Se han logrado soldaduras de hasta 85% de eficiencia, las cuales aún poseen margen de mejora.
- FSW es una tecnología en plena extensión a lo largo de la industria, por lo que es estratégico continuar con su desarrollo y mejora. Argentina es el único país de la región que cuenta con

capacidades de soldadura FSW a nivel productivo, con procesos 100% automáticos, en el ámbito aeroespacial.

- En soldaduras FSW automáticas con control por carga, es importante prestarle especial atención a la influencia de los parámetros en la estrategia de control, además de la que posean sobre la calidad y la performance. Un control por carga adecuado permitirá soldar cordones de gran extensión con aporte de calor homogéneo y alta eficiencia de junta en toda la soldadura. Se determina que es conveniente relegar algo de resistencia en pos de un mejor control en productos de vuelo.

REFERENCIAS

1. American Welding Society, «Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Applications,» AWS D17.3/D17.3M:2010, July 1, 2009.
2. ECSS, «ECSS-E-ST-32-02C - Structural design and verification of pressurized hardware Rev. 1,» 2008.