

APLICACIÓN DE LA SOLDADURA ORBITAL GTAW EN LA FABRICACION DE SISTEMAS DE TUBERIAS EN EL SUBSISTEMA DE PROPULSION DE SATELITES.

Eduard Díaz
e-mail: ediaz@abae.gob.ve

RESUMEN: El proceso de soldadura orbital se presenta como un método importante para la unión de tubos o tuberías de pequeño diámetro en diferentes sectores o industrias, especialmente en el área espacial donde se requiere un proceso de soldadura limpio y por el grado de limpieza que las normas aplican a este sector, la soldadura orbital es un proceso sumamente limpio, no genera sucio ni humos. Esta tecnología es desarrollada desde 1960 por el sector espacial y desde entonces ha crecido enormemente abarcando o extendiéndose a otros sectores industriales. Este trabajo presenta la importancia de la soldadura orbital en la fabricación de los sistemas de Propulsión de las naves espaciales y satélites. También se trata de explicar el proceso de soldadura GTAW utilizado por los equipos orbitales, el cual es un proceso muy utilizado para materiales o aleaciones que reaccionan fácilmente con el oxígeno y este proceso los protege de este fenómeno.

PALABRAS CLAVE: GTAW, Soldadura Orbital, subsistema de Propulsión, manufactura de satélites.

1 INTRODUCCIÓN.

Una vehículo espacial o satélite requieren más de 300 uniones soldadas de tuberías para el sistema de propulsión y esto se puede lograr gracias al proceso de soldadura orbital ya que con él se obtienen soldaduras de muy alta calidad que no se consiguen si fuesen realizadas en forma manual. El proceso de soldadura orbital tuvo su boom en muchas industrias en la década de 1980 cuando se desarrollaron fuentes de alimentación, estos eran físicamente más pequeños y compacto, eran llevados de un lugar a otro para soldaduras en sitio. La soldadura orbital utiliza el proceso por arco eléctrico, protección por gas y electrodo no consumible de tungsteno (GTAW) el cual es la fuente del arco eléctrico que derrite el material base y forma la soldadura. Mantener la posición del satélite durante la órbita es la función principal del subsistema de propulsión, una fuga en cualquiera de las partes soldadas puede provocar pérdida de combustible y esto comprometería la misión del satélite. Por todo esto, los parámetros de calidad en cuanto a la soldadura del sistema son extremadamente estrictos.

La soldadura orbital es predestinada como una de las más destacadas, gracias a la demanda creciente de estructuras soldadas de alta calidad de materiales con requerimientos de soldadura especial. Análogamente el desarrollo de los cabezales de soldadura ha permitido el uso de este proceso en la automatización de la soldadura

GTAW de tuberías de diámetros variables y a la vez ha sido aplicado en varias industrias como la aeroespacial, energía nuclear, la de alimentos e industrias farmacéuticas entre otras.

2 PROCESO DE SOLDADURA GTAW.

El proceso de soldadura por arco eléctrico con protección de gas inerte y electrodo no consumible, también conocido como TIG (Tungsten Inert Gas), produce el arco eléctrico mediante un electrodo no consumible y la pieza a soldar, mientras que el gas inerte protege el baño de fusión. El material de aporte cuando es utilizado, es añadido mediante varillas como en la soldadura oxiacetilénica. La figura 1 muestra el esquema de procedimiento del proceso GTAW.

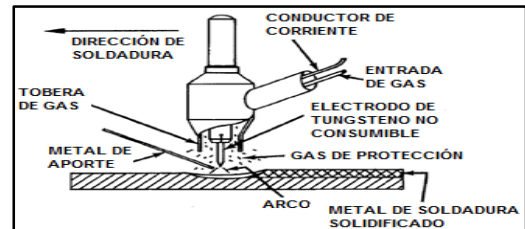


Figura 1. Representación Esquemática del Proceso GTAW [1].

2.1 VENTAJAS.

- Es un proceso muy utilizado para soldar casi todos los metales.
- Se obtiene un arco eléctrico estable y condensado.
- Aunque comenzó como un proceso manual se ha ido automatizando para obtener soldaduras en serie, como en las tuberías de espesores delgados, soldados longitudinalmente o helicoidal y para la fabricación de intercambiadores de calor.
- No se producen salpicaduras en el proceso.
- No se forman escorias en las soldaduras.
- Se obtienen soldaduras rectas y muy regulares.
- Se usan con material de aporte o no, de acuerdo del espesor del material a soldar.
- Puede utilizarse en todas las posiciones y uniones.
- Con espesores delgados se obtiene una alta velocidad de producción.
- Se consiguen con este proceso unos cordones de soldadura de altísima calidad

- Permite un excelente control en la penetración en la primera pasada de raíz.
- No demanda el uso de fuente de alimentaciones caras.
- El material de aporte y el control de la fuente de alimentación son independiente.

2.2 LIMITACIONES DEL PROCESO GTAW.

- La soldadura manual con este proceso el soldador tiene que poseer una gran habilidad y experiencia.
- No es rentable para espesores gruesos mayores a 10 mm.
- Si hay corrientes de aire es difícil la protección de la zona a soldar y se podrían formar impurezas en las mismas.
- El depósito de material soldado es muy bajo comparado con otros procesos por arco eléctrico (en el soldeo automático esta desventaja se puede solucionar con la técnica de alambre caliente).

2.3 APLICACIONES.

Se puede usar para soldar la mayoría de los metales, incluidos el aluminio, magnesio y los metales que reaccionan fácilmente con el oxígeno por ejemplo el titanio y sus aleaciones, el circonio y sus aleaciones.

Gracias a sus ventajas descritas se consigue unas soldaduras de alta calidad y con una pureza metalúrgica grande, en la mayoría de las veces sin defectos y con un acabado superficial óptimo, es ideal para soldaduras de alto riesgo en las industrias del petróleo, química, petroquímica, de alimentación, generación de energía, nuclear y aeroespacial.

Como su producción es muy lenta y baja con respecto al tiempo, no resulta rentable para soldaduras de espesores grandes. Se utiliza en estos casos solo para realizar el primer pase de raíz y luego con otros procesos se realizan los siguientes pases. Se utiliza para soldaduras por puntos y de costuras. [2].

3 SOLDADURA ORBITAL.

3.1 ANTECEDENTES.

La soldadura orbital tiene su característica en que un electrodo no consumible gira u "orbita", en torno a una pieza fija (tubo) que se está soldando. Como en el proceso con soldadura de gas inerte y electrodo de tungsteno, el arco eléctrico se produce entre el electrodo y el material a soldar. El baño de fusión está compuesto por el propio metal base. Es importante para la aplicación de soldaduras de alta calidad en sistemas de tuberías, así como para otras soldaduras difíciles y complicadas. [3].

La soldadura orbital surge en 1960 por las necesidades de la industria aeronáutica, ver figura 2, en especial de la NASA. Las técnicas de soldadura en esos años fueron incapaces de obtener soldaduras de buena

calidad, muy importante en los sistemas de tuberías en naves supersónicas. El cabezal de soldadura orbital fue desarrollado por Gasparas Kazlauskas, un ingeniero de diseño de la aviación norteamericana. Su invento fue en repuestas para soldar haces de tubos para el proyecto espacial Nuclear de Potencia Auxiliar (SNAP por sus siglas en inglés). [3]



Figura 2 Imagen de un Cohete [3].

Los equipos de soldadura orbital originales eran muy grandes, no eran adecuados para utilizarlos afuera del taller o fábrica por su peso y dificultad para trasladarlos. Además el electrodo de tungsteno tenía que orbita varias veces para precalentar, penetrar y realizar la soldadura. Después, en la década de 1980 se desarrollaron equipos de soldadura orbitales compactas y portátiles, con fuente de alimentación más avanzadas, con lo cual se logra soldaduras automáticas con un solo pase y utilizados en cualquier sitio. Este desarrollo permitió un amplio avance en las aplicaciones.

3.1.1 AUMENTO DE LAS APLICACIONES.

El aumento de las soldaduras de alta calidad por este proceso gracias a estos avance, en combinación con el ajuste de la automatización, origino que se extendiera a otras industrias como la nuclear, la farmacéutica y en la fabricación de semiconductores. Cualquier industria con requerimientos de soldadura especiales como por ejemplo la forma, tamaño del material o producto, por el espacio si es complicado realizar la soldadura se puede usar el proceso de soldadura orbital. [3].

3.1.2 CALIDAD.

Hoy en día la alta calidad de la soldadura orbital es realizada por fuentes de alimentación computarizadas y por la protección del baño de fusión de la atmosfera. Las nuevas fuentes de alimentación hace posible la realización de la soldadura con un aporte de calor pequeño, lo que minimiza la deformación. La calidad de la soldadura también es precisas porque la fuente de alimentación controla los parámetros de soldadura como por ejemplo la velocidad de rotación del electrodo, la corriente, la tensión, así como el material de aporte.

3.1.3 AUTOMATIZACIÓN.

Gracias que el cabezal de soldadura orbital como todo el material o producto están fijos y solamente el electrodo de tungsteno orbita, es ideal para la

automatización. Este proceso produce unos cordones de soldadura de calidad insuperable, constante, sino que se realiza a un bajo costo y con mayor productividad y en serie en materiales de espesores delgados.

3.2 CARACTERISTICAS DE LA SOLDADURA ORBITAL.

El proceso orbital es un método de soldadura GTAW automático, se consiguen cordones de alta calidad con una mínima inversión. Se logran uniones de soldadura con alta resistencia y como se dijo anteriormente con una gran pureza metalúrgica, también se obtiene un acabado superficial óptimo en los materiales a soldar, es ideal para soldaduras especiales como las realizadas en las industrias energéticas, nucleares, químicas, aeroespacial, de alimentación y biotecnología entre otras. Estas industrias no se pueden permitir paradas en la producción por problemas de mantenimiento, ni defectos que puedan interferir en la productividad de la empresa.

Podemos definir también la soldadura orbital como un proceso para soldar en forma circular un producto cilíndrico fijo o fijado en una base (conductos, tuberías, etc.). Para esto la antorcha o electrodo no consumible recorre una guía y orbita el producto. Con este proceso se consiguen soldaduras en serie y de buena calidad, por ello se utiliza este método. Unos de los problemas que se consiguen es la fuerza que ejerce la gravedad. Esto se evita logrando una buena programación de los parámetros de soldadura del equipo. Y se pueden soldar en todas las posiciones [4]. Ver figura 3.

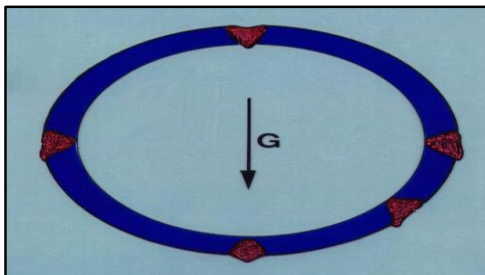


Figura 3 Acción de la Gravedad [4].

Por esta razón hay que disponer de servicios de mantenimientos preventivos y predictivos ya que se convierte en un parámetro necesario. Prevenir significa tener los mejores y más avanzados materiales, las últimas tecnologías de fabricación y reparación para obtener productos de alta calidad, sobre los cuales hay que realizar inspecciones para evitar futuras fallas. **¿Qué materiales se pueden soldar con el proceso orbital?** Casi todos los materiales se pueden soldar con el proceso GTAW, en particular el acero inoxidable y el titanio que son muy utilizados en la industria aeroespacial.

¿Qué se conoce como un cabezal de soldadura?

Un cabezal de soldadura es un equipo que se utiliza para soldar un tubo con otro tubo; un tubo con un codo; un tubo con una T; un tubo con un accesorio y proceder a la unión por el proceso GTAW orbital controlando la influencia de la atmosfera en la pieza a soldar para evitar defectos en

la soldadura. En la figura 4 se aprecia un cabezal de soldadura.



Figura 4 Cabezal de Soldadura Orbital [4].

3.2.1 PROCESO DE LA SOLDADURA ORBITAL.

El cabezal se coloca alrededor de la pieza a ser soldada por medio de unas pinzas, originándose una cámara cerrada y protegida por gas inerte evitando la acción del oxígeno. El arco de soldadura formado entre el electrodo y la pieza orbita el perímetro de la misma.

a. Materiales de Aplicación.

Los materiales a ser soldados por el proceso GTAW son: acero inoxidable, titanio, aluminio, metales basados en níquel (iconel), cobre, acero dúplex. Los procesos para inertizar depende de los requerimientos de las industrias que utilizan el proceso, es decir dependen de las necesidades de cada una de ellas, en general el acero inoxidable, el cobre y sus aleaciones necesitan inertización interior y exterior, el acero al carbono solo requiere inertización exterior y el titanio y sus aleaciones necesitan una inertización especial por su condición de oxidarse a altas temperaturas fácilmente en presencia del oxígeno.

b. Ventajas de la Soldadura Orbital.

- Excelente calidad de los cordones de soldadura.
- El proceso es muy seguro.
- Con los parámetros registrados y grabados se pueden reproducir los resultados.
- Con este método no se requiere la habilidad del soldador.
- Con la automatización es más rentable.
- Se acortan los tiempos de producción.
- Se puede realizar en espacios confinados, que serían imposible para otros procesos de soldadura.
- Muy baja contaminación por parte del medio ambiente.
- El material no se oxida gracias a la protección del gas inerte.
- El proceso se registra gracias a las nuevas fuentes de alimentación
- Se puede utilizar en exteriores.

La soldadura orbital consiste en una fuente de alimentación, un sistema de enfriamiento, un sistema controlado por un software, las bombonas de gas inerte, y los cabezales de soldadura. Ver figura 5.

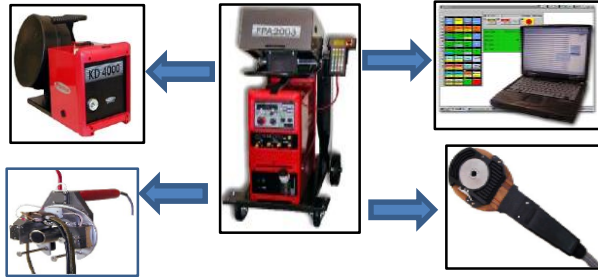


Figura 5 Composición de la Soldadura Orbital [4].

c. Factores Principales que Influyen en el Cordón Durante la Soldadura Orbital.

- Una buena limpieza de la superficie a soldar.
- Una correcta protección y depuración.
- Un buen afilado del electrodo de tungsteno.
- Utilizar la tobera correcta.
- Mantener la distancia entre el electrodo de tungsteno y la, pieza según las condiciones del fabricante.
- Centrar correctamente el dispositivo de depurado.
- Buenas condiciones ambientales como temperatura, lugar, etc.

d. Campos de Aplicación de la Soldadura Orbital.

- Microelectrónica.
- Farmacéutico/Bioquímico.
- Industria Alimenticia.
- Químico.
- Refrigeración.
- Energía.
- Centrales de Energía.
- Aviación.
- Instrumentación y Control.
- Soportes y Plataformas.
- Construcciones Navieras.



4 TECNOLOGIA DE LA SOLDADURA ORBITAL.

La tecnología orbital ofrece resguardo, buena calidad del producto y minimiza la contaminación de la soldadura, se puede obtener resultados reproducibles. La limpieza y la pasividad del proceso en las tuberías se

realizan en forma más eficiente, ahorrando unas mejoras en estas labores. La soldadura orbital se ha extendido a en diversos sectores industriales gracias a la confiabilidad del proceso, la calidad de las uniones soldadas, el aumento de la productividad por la automatización del mismo y da una mayor resistencia a la corrosión a los cordones. El equipo automático orbital tiene un cabezal cerrado que permite orbitar los tubos y unirlos, protegidos en una atmosfera de gas inerte en toda su costura y realizar la soldadura a tope. La fuente de alimentación controla el voltaje, la corriente, el flujo de gas, la velocidad de rotación, entre otros parámetros. Una vez fijados los parámetros, lo que hay que cuidar es el buen ensamblaje y la limpieza de la unión. La pulcritud obtenida con el proceso orbital permite minimizar el calor a la pieza, gracias a la aplicación de una serie de puntos traslapados y no de un cordón seguido, con penetración precisa y controlando la corriente en cada cuadrante conforme avanza al arco eléctrico en el tubo. En la figura 6 se aprecia un esquema de la soldadura a tope.

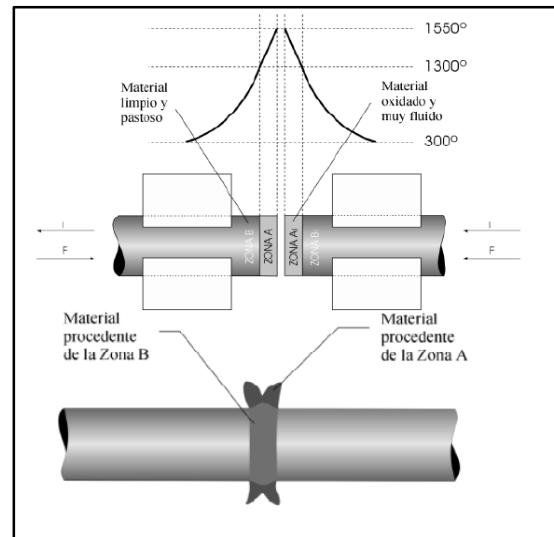
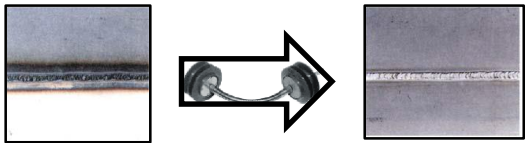


Figura 6 Soldadura a Tope Tubo a Tubo [4].

En el mercado existe tres tipos de generadores o fuente de alimentación: el generador 207 (150 amperios al 100%), generador 227 (200 amperios al 100%) y generador 415 (400 amperios al 100%). La fuente de alimentación computarizada graba o almacena una gran cantidad de programas de soldaduras (parámetros), a cada cual se le da un ajuste de acuerdo a las cualidades particulares de cada aplicación en la que es utilizada y conforme a los resultados al realizar soldaduras a muestras representativas de los tubos a instalar, teniendo cuidado en igualar todos los factores que están presente en la industria. La fuente de alimentación controla el suministro de los gases, primario y de purga, dejando cebar el proceso y arrancar el arco con alta frecuencia. El suministro de gas se deja unos segundos para el enfriamiento de la pieza y finalmente se cierra, culminando el proceso de soldadura.

También de las propiedades de limpieza y estructurales del proceso de soldadura gracias que no

produce humos ni chispas, el buen acabado del interior de las tuberías permite utilizarlos en aplicaciones en las cuales el maltrato del producto tiene que ser desechado. La baja temperatura en la que funciona todo el sistema de soldadura orbital, la precipitación de carburos es menor en la zona afectada térmicamente, por esta razón se obtiene soldaduras con alta resistencia a la corrosión, recomendado en líneas de agua pura o con concentración químicas altas. Otro punto en tener en cuenta es la depuración (inertización) de la tubería, ya que protege el cordón de soldadura en el interior de las mismas, para evitar la aparición de óxidos y color de revenido en el cordón de soldadura. Esto se evita logrando que el oxígeno pueda estar en él, interior de la tubería (contenido en el aire). Ver figura 7.



Sin Depuración

Con Depuración

Figura 7 Proceso de Depuración [4].

4.1 CABEZAL CERRADO DE SOLDADURA ORBITAL.

El cabezal de soldadura es un dispositivo el cual realiza la soldadura de dos tubos a tope en toda la costura y está protegida por la acción del gas inerte. Ver figura 8.



Figura 8 Cabezal Cerrado [5].

4.2 CABEZAL ABIERTO DE SOLDADURA ORBITAL.

El cabezal orbital abierto realiza la soldadura de la junta de los tubos y la diferencia es que solo el electrodo no consumible de tungsteno está protegido por la acción del gas inerte, es decir, no se forma una cámara cerrada como con el cabezal orbital cerrado, permite la adición de material de aporte, se controla el arco electrónicamente y sincronizada con la corriente pulsada. Ver figura 9.



Figura 9 Cabezal Abierto [5].

Viendo todas estas características esta tecnología es usada para la fabricación de las tuberías del sistema de propulsión de las naves espaciales, satélites, etc., que requieren de un proceso altamente confiable, limpio (por los requerimientos de limpieza que las normas piden en el sector espacial), por el tipo de material utilizado como es el titanio el cual es un metal que a altas temperatura se oxida fácilmente y con este proceso queda protegido del oxígeno en una atmósfera inerte y cerrada. Es un proceso que cumple con todos los estándares en cuanto al procedimiento de soldadura.

Los sistemas de propulsión de los satélites también requieren que el interior de las tuberías cumpla con unos requerimientos exigentes y estrictos, por el paso del combustible por ellas y con este proceso se puede asegurar que no queden material en el interior de las tuberías con una adecuada inertización.

5 APLICACIÓN DE LA SOLDADURA ORBITAL EN LOS DIFERENTES PROYECTOS ESPACIALES.

La aplicación de la soldadura en el sector espacial se requiere una alta exactitud, una condición que tiene que ser lo más estricto en cuanto a calidad y libre de defectos en los cordones de soldadura. El proceso de soldadura orbital automático es una tecnología que cumple con estos factores y se obtiene un producto libre de defectos.

5.1 LOCKHEED MARTIN SPACE SYSTEMS COMPANY.

Los sistemas de propulsión para satélites de los Estados Unidos y los vehículos de lanzamiento, al igual que con todos los componentes fabricados para el Programa Espacial de la NASA, deben cumplir con las normas de certificación de calidad. La Lockheed Martin Space Systems Company-Operaciones astronáutica en Denver se centra principalmente en la fabricación de vehículos de lanzamiento como los cohetes Atlas, Titán y la fabricación de naves espaciales para la NASA y el Jet Propulsion Labs (JPL). Estas son las naves espaciales en el espacio profundo para diferentes exploraciones planetarias y celestes, como la misión Cassini a Saturno en la actualidad y la misión Génesis de recoger partículas de vientos solares, significan que cada soldadura debe pasar las pruebas más altas de pureza e integridad. La figura 10 muestra la instalación del Sistema Propulsor de un Cohete Atlas.



Figura 10 Los Técnicos del Lockheed Martin Space Systems Company montan el Sistema Propulsor de un Cohete Atlas [6].

Para una nave espacial típica, la tubería del sistema de propulsión requiere más de 300 soldaduras. Los vehículos de lanzamiento de naves espaciales utilizan una variedad de tubos, hecho principalmente de materiales de acero inoxidable y titanio, con espesores de pared que van desde los más fina, 0,016-0,090 pulgadas y diámetros que van desde 1/8 a 1 1/2 pulgadas. Debido a que algunos de los materiales utilizados para el tubo son delgados y por lo tanto es difícil de soldar consistentemente a mano, el centro utiliza soldadura orbital automática. Este proceso ayuda a hacer soldaduras consistentemente uniformes. Los productos deben estar libres de defectos, por lo que las soldaduras deben tener una penetración completa y cumplir con la Clase A de estándares de calidad de rayos X. Mucho tiempo y esfuerzo se gastan en el control del proceso para asegurarse de que cada soldadura cumpla con los estándares de calidad más exigentes. Los cabezales de soldadura orbital no contaminan el tubo, que pueden causar un problema de fuga en el sistema interno o un defecto de soldadura tales como la porosidad. El gas de purga se mantiene limpio y libre de contaminación de oxígeno o de humedad del tanque de suministro a la junta de soldadura.

El cabezal de soldadura mantiene las partes en alineación y proporciona una completa cobertura del gas inerte en la zona de soldadura. Las fuentes de poder de la soldadura orbital mantiene el control de los parámetros de soldadura críticos, tales como amplificadores, voltios, y la velocidad de desplazamiento, que son necesarios para soldaduras exitosas. Para este tipo de soldadura, el equipo utilizado debe tener un buen control de arco de partida. Además, no debe entregar corriente de soldadura a menos que se establezca un arco. Esto ayuda a prevenir que cuando se está soldando se quemen los materiales delgados. Los cabezales de soldadura de cámara cerrada fabricados para la soldadura orbital en las industrias aeroespacial y otras industrias de alta pureza son fáciles de usar. Estos cabezales son diseñados específicamente para la soldadura autógena de los tubos de acero inoxidable y de titanio delgados. La cubierta protectora de gas es posible por el cabezal de soldadura cerrada, evita la decoloración y fragilización causada por la exposición al oxígeno, nitrógeno o hidrógeno, todos los cuales son perjudiciales para las soldaduras.

5.1.1 SUB-ENSAMBLAJES DE TUBERÍAS.

El sub-ensamblajes de tubos son soldados en el banco con una herramienta de fijación. Además de los tubos, las piezas soldadas constan de otros componentes como piro válvulas, válvulas de retención, transductores de presión, reguladores, reductores de tubos y orificios de flujo. Cuando estos sub-ensamblajes se montan en los vehículos, el tubo está interconectado a los tanques de combustible y luego a los motores de los cohetes. La soldadura orbital también se utiliza para conectar los sub-ensamblajes de la estructura principal. Para ello, los soldadores llevan el equipo al vehículo y a la posición de la soldadura. La articulación principal de la soldadura es una soldadura a tope cuadrado, y las soldaduras a tope socket también se utilizan. La instalación siempre trata de soldar espesores iguales de pared, si es posible. Ocasionalmente, sin embargo, espesores de pared que no coincidentes se sueldan. Esto no es un método preferido de diseño, pero se puede manejar cuando sea necesario. La instalación cuenta con una aplicación en la que se realiza una soldadura de filete entre dos tubos con diferentes diámetros exteriores (ODs).

5.1.2 LOS PREPARATIVOS DE LA SOLDADURA.

La limpieza es crítica. El material tiene que estar certificado químicamente, resistencia y otros criterios antes de ser aceptado. El titanio y los tubos de aceros inoxidable no pueden tener ninguna contaminación y deben estar totalmente limpio. Utilizando los datos de ingeniería CAD para la configuración correcta, primero se doblan los tubos para dar forma con el equipo de doblado NC. Los extremos de los tubos se encuadran a 0,002 pulgadas y se eliminan las rebabas para asegurar el ajuste apretado-up para la soldadura. El tubo se pasa a través de una secuencia de pasos de limpieza para asegurar el tema de los requerimientos de la instalación. Toda la soldadura orbital se hace en una habitación limpia. Los tubos pasan a través de un proceso de limpieza de alto nivel en el que se comprueban que no tengan contaminación de partículas y residuos no volátil. El trabajo se realiza con un grado de limpieza de Clase 10 000 o Clase 100 000 de cuarto limpio, dependiendo de los requisitos del programa. El mantenimiento de este nivel de limpieza requiere una sala de acceso controlado con filtración de aire especial, y los técnicos de soldadura deben llevar trajes completos de sala limpia, incluyendo guantes de látex. Además, los procedimientos detallados están en su lugar para el manejo del hardware para asegurar que no se introduzca la contaminación durante el proceso de soldadura. Los soldadores ajustan el tubo para la soldadura, asegurando que ningún hueco o desajuste esté presente en la unión soldada. Las partes se les dan una limpieza final con disolvente y comprobación visual antes de ser ensamblado y soldado [6].

5.1.3 CERTIFICACIÓN.

La Operación Astronáutica es responsable de la entrega de un sistema de propulsión certificado para la NASA, que luego utiliza todos los datos de la prueba que

la empresa genera para la aceptación de la NASA de la calidad de la soldadura y la funcionalidad del sistema. Los procedimientos de soldadura están perfectamente calificados a través del laboratorio de control de calidad de la Lockheed antes que la soldadura se realice en un vehículo. Una vez que el vehículo está soldado, las soldaduras se inspeccionan visualmente, con radiografía, una a una, y se realizan pruebas de fugas con helio al menos una vez. A veces el sistema de propulsión pasa por varios ciclos o diferentes ciclos de inspección para asegurar la integridad del sistema.

Durante la certificación, de rayos X de vez en cuando encuentra una indicación de falta de penetración. Este tipo de defecto se produce si el electrodo de tungsteno no está alineado perfectamente sobre la junta de la soldadura. Una pequeña porción de la soldadura no pudo haber sido penetrado completamente. Típicamente, un ciclo vuelve a soldar la reparación que se hace sobre la soldadura. El gas argón se utiliza para asegurar que la soldadura tenga una buena purga antes de cualquier soldadura o se vuelve a soldar.

5.2 INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES ESPACIALES (INPE), BRASIL.

Durante la década de 1980, el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE, sigla en portugués) comenzó a desarrollar programas prioritarios como CBERS (China-Brasil Recursos Terrestres), que es un esfuerzo de cooperación entre los gobiernos de Brasil y China. Una de las características de CBERS es su estabilización en tres ejes. Esto se debe a un control de posicionamiento conocido como el sistema de propulsión. Este está constituido de cuatro tanques de almacenamiento de combustible (hidracina), dieciséis micros propulsores de 1N y dos de 20 N, válvulas y filtros, entre otros, así como las líneas de distribución hechos de titanio comercialmente puro - grado 2 - para interconectar los diversos componentes. Mantener el posicionamiento del satélite durante la órbita depende básicamente de este sistema. Una fuga de combustible eventual de sus soldaduras comprometería toda la misión. Por esta razón, los criterios de calidad en cuanto a la soldadura de sus componentes son extremadamente riguroso y siguen las normas de fabricación china para el sector aeroespacial.

5.2.1 CONSIDERACIONES SOBRE EL TITANIO Y SUS ALEACIONES.

El titanio se utiliza en sus grados comercialmente puros o en combinación con otros elementos conocidos como aleaciones. Posee características únicas, que son responsables de la estimulación del extenso interés de una amplia gama de segmentos industriales, en particular, la industria aeroespacial que utiliza primero componentes de titanio en aviones y después en la nave espacial. El titanio comercialmente puro se utiliza en situaciones de elevada resistencia a la corrosión asociados con la formación. Aunque el acero inoxidable de la serie 300 tiene características similares y es

significativamente más barato, su uso en la industria aeroespacial es limitado debido a su mayor densidad [7]. Boyer (1996) muestra que hay alrededor de una reducción del 50% en peso estructural cuando se utilizan el titanio y sus aleaciones en contraposición a las aleaciones convencionales. [8]

Otra característica interesante metalúrgico del titanio y sus aleaciones son los niveles de resistencia a la corrosión del metal base en las uniones soldadas. En el satélite CBERS específicamente, el uso de titanio se limita al sistema de propulsión, en otras palabras, las líneas de ultra alta pureza del circuito de hidracina. Básicamente, la instalación consta de varios elementos interconectados por tubos de pequeño diámetro. Sus articulaciones están conectados utilizando el proceso GTAW Orbital debido a las exigencias extremas respecto a la calidad del producto final.

5.2.2 CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA SOLDADURA ORBITAL GTAW.

Los sistemas de soldadura orbital se componen de una fuente de alimentación programable, un cabezal de soldadura orbital, cables eléctricos, mangueras de gas y los accesorios opcionales. La fuente de alimentación es una pieza portátil, completamente programable, equipos cuya secuencia de soldadura es controlada por medio de un microprocesador. Esto permite ajustar diferentes niveles de las variaciones de soldadura según el diámetro, espesor y material a soldar. La Precisión con relación con los parámetros de soldadura es del orden de $\pm 1\%$. La máquina de soldadura permite programar los parámetros tales como la velocidad de soldadura y el amperaje, ya sea continua o pulsada (Morgan y Henon, 1999; Henon, n.d.) [9]. La soldadura se lleva a cabo en un solo pase en las juntas a tope cuadrados, cuya configuración típica puede verse en la figura 11 (Morgan y Henon, 1999; Brond y Henon, 1996). [9]

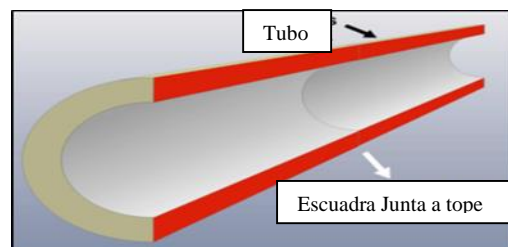


Figura 11 Configuración de la Junta [7].

5.2.3 PREPARACIÓN DEL METAL BASE (SELECCIÓN, CORTE Y MECANIZADO).

Debido a las rigurosas normas aplicadas para soldar, la calidad del grano, la presencia de una brecha entre los componentes a soldar es una razón de rechazo de acuerdo con los procedimientos aeroespaciales. Igualmente, deformidades, redondez irregular y variaciones de espesor a lo largo de las juntas son responsables de causar inconsistencias. Sobre la base de tal información, es necesario un control estricto, en

relación con la especificación de materiales tales como tolerancias dimensionales, así como la preparación de las articulaciones y el mecanizado obligatorio con un equipo apropiado. Los tubos se cortan en longitudes apropiadas, que es seguido por el mecanizado de ambas extremidades con respecto a la requisitos de perpendicularidad ($<0,02$ mm), la sección de redondez ($<0,05$ mm), ausencias de desbarbado y biselado de los bordes. A continuación, el gas argón se inyecta en los tubos para eliminar los residuos sobrantes de las operaciones anteriores. Cuando se mecanizan por completo, los bordes se le eliminan las rebabas y son configurados para la soldadura. [7]

5.2.4 PROCEDIMIENTOS DE LIMPIEZA.

En primer lugar, decapado químico se lleva a cabo para eliminar la capa de óxido. Las pruebas iniciales establecen el tiempo promedio para la inmersión de las probetas en soluciones ácidas en sucesivos baños (ácido nítrico al 70%, ácido fluorhídrico al 50% y agua con distintas fracciones de 15, 3 y 82 partes por volumen, respectivamente). Se transfirieren a un horno para el secado, donde permanecerán durante 2 horas a una temperatura de 50 a 60 ° C. La limpieza final (o limpieza interna) consiste en hacer circular el alcohol isopropílico a través de los interiores de los tubos mientras está conectado a una máquina de 99,995% de nitrógeno gaseoso puro y a una presión de $1,5 \pm 0,5$ bar. La máquina contiene filtros de vacío en varios puntos del sistema de limpieza. El propósito de esta operación es para verificar el grado de limpieza. Una vez que se han cumplido los criterios preestablecidos, con respecto a la dimensión de las partículas, el ciclo se interrumpe y se secan los componentes a una temperatura de 60 ± 5 ° C. La Figura 12 describe el equipo utilizado.

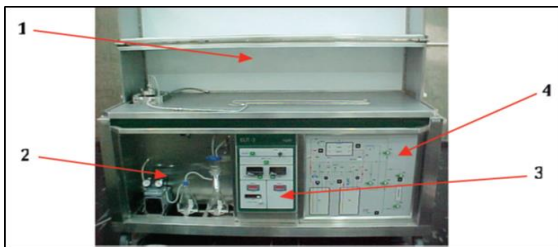


Figura 12 Equipos de limpieza final. (1) Compartimento de Limpieza y secado; (2) circuito de recogida de muestras para el análisis; (3) controles del equipo; (4) circuito de limpieza [7].

5.2.5 ALINEACIÓN.

Para los sistemas orbitales, la precisión de la alineación entre las piezas a soldar es de considerable importancia, con respecto a la calidad de los cordones de soldadura. Si hay cualquier proyección interna, como resultado de los ajustes indebidos; estos pueden interferir en el flujo de fluidos (hidracina) o, en casos extremos, se requiere volver a trabajar. Para este propósito, un indicador de alineación de acero inoxidable fue diseñado para superar esto. El modelo consta de 2 partes, cada una

de las cuales tiene una ranura en su parte interior para alinear los tubos, como se ve en la figura. 13. Los cuatro tornillos externos ayudan en la obtención de los tubos mientras que las centrales garantizan el correcto posicionamiento. Las aberturas laterales de 180 ° facilitan la vista del soldador de la articulación y por lo tanto la operación de punteo manual. [7]

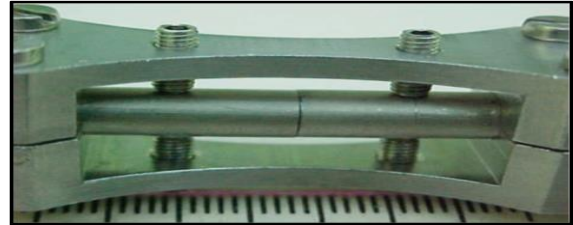


Figura 13 Medidor de alineación [7].

5.2.6 CONTROL DE LA PRESIÓN DE GAS DE PURGA.

La técnica para la presurización consiste en establecer una presión positiva dentro de las partes mediante el suministro de gas de purga a una presión constante. Su valor depende del diámetro del tubo, la posición de la articulación, las pérdidas de presión y un tapón de purga hermético con un pequeño orificio de salida para restringir el escape de gas (Henon y blanco, n.d) [9]. Esta práctica permite controlar la geometría del cordón de soldadura y evita la ocurrencia de discontinuidades.

5.2.7 PARÁMETROS DE SOLDADURA.

Los parámetros de soldadura para cada uno de los programas, producen soldaduras planas, lisas, de anchura homogénea alrededor de sus perímetros y están desprovistas de la oxidación u otros defectos en los diámetros exterior e interior. La Figura 14 muestra la soldadura de las probetas junto con los respectivos equipos, suministro de energía, la cabeza orbital y manómetro. Después de leer la presión, el dispositivo se retira del sistema y sustituido por el cabezal de soldadura orbital, y la soldadura se lleva a cabo. La presión es el resultado de la velocidad de flujo en el diámetro del tubo interno (ID) de gas de purga y el tamaño del orificio de restricción, el tapón de purga es utilizado al final. La diferencia de presión se ajusta aumentando o disminuyendo la velocidad de flujo. La presión de trabajo debe ser suficiente para producir cordones de soldadura con el mismo perfil que las paredes del tubo.

5.2.8 PUNTEO CON SOLDADURA MANUAL.

Esto es necesario para mantener las piezas en posición. Esta operación se realiza de forma manual utilizando una antorcha GTAW sin metal de aporte. La dimensión de las tachuelas debe ser mínimo, sin embargo lo suficientemente resistentes para mantener la articulación alineados.

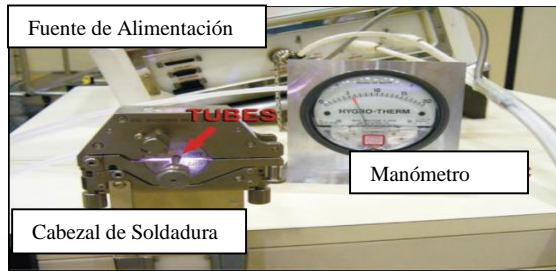


Figura 14 Operación GTAW Orbital [7].

5.2.9 INSPECCIÓN VISUAL Y DE RAYOS X.

La Figura 15 muestra el cordón de soldadura típica de los programas de soldadura empleados, donde es posible ver el aspecto de la cara y la raíz. Sus principales características son la uniformidad de ancho, la alineación, la penetración total, el acabado suave y sin oxidación en las regiones calientes. El examen del diámetro interior de las uniones soldadas mediante un baroscopio indica la conformidad con las Normas de Calidad de China (CAST, nd). Inspección de rayos X no reveló defectos.



Figura 15 Tubos de Titanio Soldados por Soldadura Orbital [7].

Para fines de ilustración, la figura 16 son representativos de la integración del satélite CBERS, llevado a cabo en las instalaciones del INPE / LIT.



Figura 16 Operación con Soldaduras [7].

5.3 PROGRAMA DE LA PLATAFORMA MULTI-MISIÓN-PMM DEL INSTITUTO NACIONAL BRASILEÑO DE INVESTIGACIONES ESPACIALES-INPE.

El instituto Nacional Brasileño de Investigaciones Espaciales-INPE está desarrollando un satélite de tamaño ligero (400 a 600 kg) basado en el programa de la Plataforma Multi-Misión-PMM. Esta plataforma corresponde al módulo de servicio del satélite, que

contiene: un subsistema de propulsión, las baterías, Paneles solares, transpondedores, ordenadores de a bordo, sensores y actuadores para el control de actitud, acondicionamiento y gestión de energía de la unidad, etc.

Es el primer satélite del programa espacial Brasileño de imponer el desafío para el desarrollo del sistema de propulsión, que es de la responsabilidad de la empresa Fibraforte. Se presenta los detalles de la fase de soldadura y las pruebas de calificación del subsistema de propulsión que consiste en tuberías y componentes hechos de titanio comercialmente puro (grado 2) y aleación de titanio Ti 6Al-4V (grado 5). Detalles de piezas de soldadura con diferentes articulaciones (grado 2 con 2, grado 2 con 5 y grado 5 con 5) con espesores de pared que van desde 0,4 mm a 0,9 mm. En el 2001, el Instituto Nacional Brasileño para recursos Espaciales-INPE comienza el programa llamado "Plataforma Multi-Misión-PMM". Consiste en un satélite no especificado con un módulo de servicio que puede ser usado en una familia de satélites de tamaño medio de diferentes misiones. Inicialmente previsto para cargar alrededor de 250 kg, el PMM puede unirse con el módulo de carga útil de dimensiones y peso comparables, comprenden satélites de la clase 500 kg [10].

5.3.1 CALIFICACIÓN DEL SUBSISTEMA DE PROPULSION DEL PMM.

El proceso de calificación de toda la Plataforma Multi-Misión comprende pruebas de todos los elementos constitutivos de su QM (Modelo de calificación), incluyendo la estructura y subsistemas, hasta la integración y las pruebas del modelo de vuelo. Como decíamos anteriormente, este documento se centra específicamente en el subsistema de propulsión, en relación con la calificación de su fase de soldadura de titanio.

5.3.2 SUBSISTEMA DE PROPULSION DEL PMM.

El subsistema de Propulsión es ensamblado sobre el panel inferior del PMM. Un total de 6 propulsores cruzan a la otra cara de este panel, así como una porción esférica del tanque con la tubería del agente propulsor. Los componentes y las tuberías están fabricado en titanio comercialmente puro (CP-Ti Grado 2) y aleación de titanio con 6% de aluminio y 4% de vanadio (Ti 6Al-4V Grado 5). El PMM emplea tubos de titanio de diámetro exterior igual a 6,35 mm y el espesor nominal de 0,889 mm. Algunos componentes tienen puertos de entrada y de salida que tiene el mismo diámetro exterior pero con reducción de espesores, respectivamente de 0.508 mm y 0.425 mm. Las partes principales del subsistema de propulsión son: tanque de propulsor / de presurización de gas (nitrógeno); y válvulas de llenado/drenaje; enclavamiento de válvulas; transductor de presión; filtro de combustible; tuberías; propulsores; cableado y conectores; aislamiento térmico y calentadores. El panel inferior de montaje y soportes para equipos y tuberías son considerarse como parte del subsistema de la estructura de la plataforma. La figura 17 muestra la Plataforma PMM con el subsistema de Propulsión en el panel inferior.

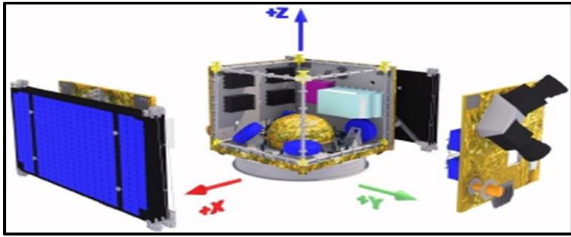


Figura 17 Vistas Ampliadas del Módulo PMM [10].

5.3.3 SOLDADURA DE TUBERÍAS Y COMPONENTES DE TITANIO.

Los extremos que van a fusionarse deben mecanizarse previamente para obtener un ajuste perfecto. Las piezas deben ser inmovilizadas por dispositivos de fijación. Para asegurarse de que no suceda durante el montaje la desalineación para el buen funcionamiento del cabezal orbital, manualmente recibe al menos dos puntos de soldadura. La soldadura es autógena, es decir, no hay ninguna adición de metales de aporte. Sólo la aleación de titanio o titanio original está presente en la soldadura. El argón se inyecta dentro de los tubos, y en la región que rodea a la junta a soldar. Las presiones y caudales deben estar bien controlados para obtener buenos cordones de soldadura y sin imperfecciones, como convexidades, concavidades, poros, etc.

Es importante para mantener un flujo adecuado y continuo de argón a través de las tuberías de las piezas que se sueldan, así como una atmósfera inerte de argón alrededor de ellos. Las uniones de los tubos de titanio a soldar debe estar ubicado en regiones rectilíneas de las partes interesadas en, por lo menos 2 cm aparte de cualquier curvas, pliegues o componentes, debido a la necesidad de insertar el cabezal de soldadura orbital. Figura 18 ilustra la inserción de la cabeza orbital de tal manera.

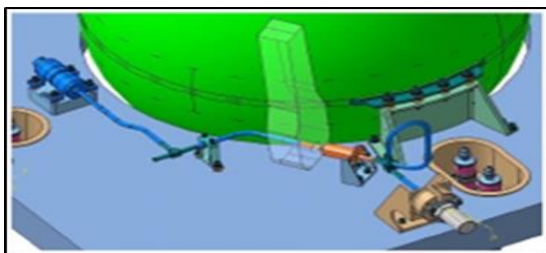


Figura 10 Inserción Cabezal Orbital [10].

6 CONCLUSIONES.

Las soldaduras de los productos espaciales son críticos. Una vez que el vehículo espacial es puesto en marcha y en órbita, no hay manera de arreglarlo. Si sólo una de las soldaduras falla, una misión se puede perder, con consecuencias catastróficas. Las Aplicaciones de soldadura en las industrias aeroespaciales requieren una

alta precisión, una cualidad que puede ser reproducida en su totalidad, y con una tasa de rechazo lo más bajo posible. La Soldadura orbital es utilizada para realizar estos trabajos y cumple a cabalidad con todos estos requerimientos. El avance en la tecnología orbital con unas fuentes de alimentación más poderosas y compactas, así como la calidad de los materiales y el proceso de fabricación contribuyen con el éxito del trabajo.

Se podría concluir que las operaciones de soldadura implican el control de las condiciones ambientales, el corte y el mecanizado del metal base, pero los procedimientos de limpieza, la alineación y el tipo, la geometría, las dimensiones y la instalación del electrodo de tungsteno se muestran para ser eficaz, además de ser necesario para el éxito de la soldadura.

7 REFERENCIAS

- [1] S. Aristizábal Mesa, "Efectos de los parametros de GTAW pulsado en la microestructura y propiedades de la aleacion de titanio Ti-6Al-4V," Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2013.
- [2] LINCOLN ELECTRIC, "Soldadura bajo atmósfera inerte y electrodo de tungsteno (TIG)," Departamento de Formacion Lincoln-KD, S.A., 2002.
- [3] W. Shirey, "Historia de la soldadura orbital," Mersud, Santiago, 2004.
- [4] FRONIUS, "Información sobre soldadura orbital TIG," Fronius International, 2004.
- [5] Direct Industry, "Direct Industry," Grupo VirtualExpo, 27 Junio 2014. [En línea]. Available: <http://www.directindustry.es/prod/magnatech-llc/cabezales-soldadura-circulares>. [Último acceso: 25 julio 2014].
- [6] M. Serafin, "Orbital welding for space program applications: producing welds that withstand the rigors of deep space", *The Tube & Pipe Journal* Denver, february, 2001.
- [7] J. A. O. d. Garcia, N. S. Dias, G. L. d. Lima, W. D. B. Pereira y N. F. Nogueira, "Advances of orbital gas tungsten arc welding for Brazilian spaqce applications," de *J. Aerospace Technology Management* , Sao José dos Campos, INPE, 2010, pp. 203-210.
- [8] R. Boyer, "An overview on the use of titanium in the aerospace industry," *Materials Science and Engineering A*, vol. 213, nº 1-2, pp. 103-114, 1996.
- [9] B. H. J. Morgan, "Discovering applications for orbital fusion welding Arc Machines," 1999. [En línea]. Available: <http://www.arcmachines.com/appPages/tpj02.html>. [Último acceso: 27 08 2014].
- [10] M. K. a. J. N. G. Durval Zandonadi Jr., "Welding and testing of propulsion subsystem of PMM-Based satellite qualification model," American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., San Diego, CA, AIAA 2013-5367, 10 Sep. 2013.