

## RESUMEN

Los fabricantes de motores aeronáuticos exigen a las organizaciones de mantenimiento que dispongan de soldadores homologados para realizar reparaciones en los componentes. Los certificados de homologación son la mejor garantía de que los soldadores poseen la destreza y conocimientos necesarios para realizar trabajos de soldadura. Estas homologaciones se realizan tanto a los soldadores que emplean métodos manuales como a operadores de máquinas de soldeo.

Este proyecto está dividido en dos partes. En la primera parte se muestra el proceso necesario para que un soldador sea homologado según el código AWS D17.1 “Especificación de la soldadura por fusión para aplicaciones aeroespaciales”. Para ello, un soldador fue homologado en soldadura manual TIG (Tungsten Gas Inert / Soldadura en atmósfera inerte con electrodo no consumible) en los grupos de materiales más frecuentemente utilizados en motores de avión. En el proyecto se muestran los tres documentos necesarios para su homologación: la Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS: Welding Procedure Specification), el Registro de Calificación del Proceso (WPQR: Welding Procedure Qualification Record) y la Calificación del Desempeño del Soldador (WPQ: Welder Performance Qualification). Los ensayos de homologación se realizaron sobre unas probetas y se validaron mediante inspección visual, inspección por líquidos penetrantes, inspección por rayos X y análisis metalográfico.

En la segunda parte se muestra el proceso necesario para validar una reparación que no está incluida en el Manual de Reparaciones del fabricante del motor. En este caso se ha definido una instrucción de reparación para recrecer las cuchillas de un cierre de cuchillas mediante soldadura TIG orbital. Para sustanciar la instrucción de reparación el fabricante requirió una serie de ensayos metalográficos de las cuchillas soldadas. En este caso se homologó a un operador de soldadura para realizar este proceso.



<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>1. GLOSARIO</b>	<b>5</b>
<b>2. PREFACIO</b>	<b>7</b>
2.1. Origen del proyecto.....	7
2.2. Motivación .....	7
2.3. Requerimientos previos .....	8
<b>3. INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
3.1. Objetivos del proyecto .....	9
3.2. Abasto del proyecto .....	9
3.3. Turbinas de gas en aviones.....	10
3.4. Selección de materiales metálicos en turbinas de avión .....	12
3.4.1. Materiales para la fabricación de componentes de la zona del compresor.....	14
3.4.2. Materiales para la fabricación de componentes de la zona de combustión. ....	17
3.4.3. Materiales para la fabricación de componentes en la zona de turbina. ....	18
3.5. Proceso de overhaul en motores.....	24
3.6. Reparaciones por soldadura en piezas de motor. ....	26
3.6.1. Clasificación de los tipos de soldadura.....	27
3.6.2. Soldadura GTAW o TIG .....	28
<b>4. CALIFICACIÓN DE SOLDADORES</b>	<b>35</b>
4.1. Procedimiento experimental .....	35
4.1.1. Probetas para calificar soldadores en centros MRO. ....	36
4.1.2. Elaboración y calificación de procedimientos de soldadura .....	37
4.1.3. Proceso de Soldadura.....	41
4.2. Resultados .....	49
4.2.1. Materiales base y varillas utilizadas.....	49
4.2.2. Calificación soldadores en el Grupo IIIb (aleaciones base níquel) .....	50
4.2.3. Calificación soldadores en el resto de grupos.....	69
<b>5. HOMOLOGACIÓN Y SUSTENTACIÓN DE LA REPARACIÓN DE UN CIERRE DE CUCHILLAS POR SOLDADURA TIG.</b>	<b>75</b>
5.1. Descripción, composición química y fases presentes del material base. ...	77
5.1.1. Composición química Inconel 901.....	77
5.1.2. Estructura Inconel 901 .....	77
5.1.3. Endurecimiento por precipitación .....	80
5.1.4. Propiedades físicas Inconel 901 .....	81
5.1.5. Propiedades mecánicas del Inconel 901 .....	81

5.2. Proceso experimental .....	82
5.2.1. Proceso de reparación propuesto .....	82
5.2.2. Equipo de soldadura .....	85
5.2.3. Etapas críticas de la reparación .....	85
5.3. Resultados .....	91
5.3.1. Caracterización del material base. ....	91
5.3.2. Optimización parámetros de soldadura .....	94
5.3.3. Microestructura de los cordones de soldadura en bruto. ....	96
5.3.4. Microestructura de los cordones de soldadura tras el tratamiento térmico de solubilizado.....	97
5.3.5. Microestructura de los cordones de soldadura tras el tratamiento térmico de envejecido. ....	98
5.3.6. Consideraciones sobre el mecanizado. ....	100
5.3.7. Inspección por Líquidos Penetrantes .....	101
5.3.8. Recubrimiento de las cuchillas por proyección térmica.....	102
5.3.9. WPS.....	103
5.3.10. WPQR .....	104
5.3.11. WPQ .....	105
<b>6. ESTUDIO ECONÓMICO _____</b>	<b>107</b>
6.1. Costes en la calificación de soldadores .....	107
6.2. Viabilidad económica de la reparación del cierre de cuchillas. ....	110
<b>7. IMPACTO AMBIENTAL _____</b>	<b>113</b>
<b>8. CONCLUSIONES _____</b>	<b>117</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA _____</b>	<b>119</b>
9.1. Referencias bibliográficas.....	119
9.2. Bibliografía complementaria.....	120
<b>10. ANEXOS _____</b>	<b>121</b>



## 1. GLOSARIO

AMS: Aerospace Material Specifications./ Especificaciones de Materiales Aeroespaciales.

AWS: American Welding Society / Sociedad Americana de Soldadura.

CA: Corriente Alterna.

CC: Corriente Continua.

CWI: Certified Welding Inspector / Inspector de Soldadura Certificado.

EASA: European Aviation Safety Agency / Agencia Europea de Seguridad Aérea.

END: Ensayos No Destructivos.

HAZ: Heat Afected Zone / Zona Afectada Térmicamente.

LPC: Low-Pressure Compressor / Compresor de Baja Presión.

HPC: High-Pressure Compressor / Compresor de Alta Presión.

LPT: Low-Pressure Turbine / Turbina de Baja Presión.

HPT: High-Pressure Turbine / Turbina de Alta Presión.

HV: Hardness Vickers / Microdureza Vickers.

GTAW: Gas Tungsten Arc welding / Soldadura en atmósfera inerte con electrodo no consumible.

MRO: Maintenance, Repair, and Overhaul / Mantenimiento, Reparaciones y Overhaul.

MT: Magnetic test / Ensayo por Partículas Magnéticas.

NGV: Nozzle Guide Vane / Álabes guía de turbina

OEM: Original Engine Manufacturing / Fabricante de Equipos Originales.

PT: Penetrant Test / Ensayo por Líquidos Penetrantes

RT: Radiographic Test / Ensayo radiográficos.

TBC: Thermal Barrier Coating / Recubrimiento Barrera Térmica.

TIG: Tungsten Inert Gas / Soldadura en atmósfera inerte con electrodo no consumible.

UT: Ultrasonic Test / Ensayos por Ultrasonidos.

Vf: Fracción de Volumen.

VT: Visual Test / Inspección Visual

WPS: Welding Procedure Specification / Especificación del Procedimiento de Soldadura.

WPQR: Welding Procedure Qualification Record / Registro de Calificación del Proceso

WPQ: Welder Performance Qualification / Calificación del Desempeño del Soldador.

ZAT: Zona Afectada Térmicamente.



## **2. PREFACIO**

### **2.1. Origen del proyecto**

Cualquier proceso que pueda cambiar o alterar las propiedades de un material o la integridad física de una pieza mediante la introducción de tensiones por operaciones mecánicas, térmicas o químicas se considera un Proceso Especial. Una característica de los Procesos Especiales es que los resultados finales de la aplicación no pueden ser verificados si no es con una prueba destructiva. En muchas aplicaciones industriales, como en el mantenimiento de motores de avión, es imposible realizar este tipo de pruebas destructiva.

Los procesos de soldadura están clasificados como procesos especiales, debido a las dificultades que se presentan durante la verificación de las propiedades de los materiales a soldar, del metal de soldadura y de la zona afectada térmicamente (sin ensayarse destructivamente), por lo que este proceso debe ser controlado de forma continua. Otros ejemplos de procesos especiales son los tratamientos térmicos o la proyección térmica.

Una condición sine qua non y necesaria para poder aplicar un proceso especial en la industria aeronáutica es que dicho proceso esté regulado por unos procedimientos calificados interna o externamente. En el caso concreto de los procesos de soldadura se requiere que los soldadores y los procesos estén homologados según el código AWS D17.1. “Especificación de la soldadura por fusión para aplicaciones aeroespaciales”

Normalmente, los parámetros de soldadura suelen estar recogidos en los manuales de reparación de los fabricantes de motor (OEM) por lo que no es necesario que los procesos estén calificados en los centros de mantenimiento MRO (Maintenance Repair & Overhaul). En cambio los fabricantes de motor si requieren que el personal de soldadura del centro MRO estén calificados en las diferentes técnicas de soldadura. Si no están calificados la organización MRO no podrá reparar componentes aeronáuticos por soldadura.

### **2.2. Motivación**

Los clientes y fabricantes de motores de avión exigen a los centro de mantenimiento y overhaul de motores que los soldadores y operadores de soldadura estén calificados bajo el código AWS D17.1.

En el caso de que no estén calificados las autoridades aeronáuticas competentes pueden retirar la licencia para realizar reparaciones por soldadura a estos centros.

### 2.3. Requerimientos previos

Las organizaciones que participan en el mantenimiento y overhaul de componentes de motores de avión deben de ser aprobadas bajo la normativa EASA parte 145. Si no están aprobadas bajo esta normativa no podrán reparar piezas aeroespaciales.

En 2002, el Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea aprobaron el reglamento (EC) No 1592/2002. En este reglamento se recogen las normas comunes en el ámbito de la aviación civil europea. A raíz del reglamento se constituyó la EASA (Agencia Europea de Seguridad Aérea) cuyo objetivo es establecer un nivel uniforme de la aviación civil en Europa. Para ello la EASA es un organismo independiente en asuntos técnicos y dispone de autonomía jurídica, administrativa y financiera, siendo un órgano dotado de personalidad jurídica y capacidad para ejercer las competencias de ejecución que le confiere el Reglamento (EC) No 1592/2002.

En 2006 la Comisión Europea aprobó el Reglamento (EC) No 2042/2003 cuyos objetivos principales son:

- Asegurar la constante capacidad de aeronavegabilidad de cualquier producto aeronáutico. Para ello se adoptarán unos requisitos técnicos y procedimientos administrativos comunes.
- Crear un reglamento técnico que han de cumplir las organizaciones y el personal involucrado en el mantenimiento de los productos aeronáuticos, con el fin de garantizar, demostrar y asumir las responsabilidades de los trabajos realizados.

La normativa EASA Part-145 describe las condiciones necesarias para que una organización de mantenimiento MRO pueda ser aprobada. Esta normativa detalla los requisitos necesarios que debe cumplir el personal, las herramientas, la planificación de los trabajos de mantenimiento, el control de registro de los trabajos efectuados, la política de calidad y seguridad que la organización debe seguir, la estructura de la empresa, etc.

Por este motivo los procesos de soldadura en el mantenimiento motores de avión sólo pueden realizarse si la organización está aprobada según la Part-145. Consecuentemente, es requerido que estos procesos se lleven a cabo por personal calificado, con una supervisión y control continuo de los parámetros del proceso para asegurar la conformidad del producto con los requisitos especificados.





## 3. INTRODUCCIÓN

### 3.1. Objetivos del proyecto

El presente proyecto, tiene por objeto el calificar a soldadores mediante TIG manual en los materiales más frecuentes en una planta de una organización de mantenimiento (MRO) y calificar a un operador de soldadura con la sustentación de una nueva reparación en una máquina de soldadura TIG orbital.

### 3.2. Abasto del proyecto

El proyecto comprende dos líneas diferenciadas. La primera es calificar a soldadores mediante TIG manual según la AWS D17.1 y la segunda es calificar a un operador de soldadura TIG orbital y sustentar una nueva instrucción de reparación para recrecer las cuchillas de un cierre de turbina mediante la deposición de metal fundido.

Con objeto de calificar a los soldadores y operador de soldadura, es necesario realizar previamente la calificación de un procedimiento y que consta de las siguientes fases:

1. Realización de una Especificación del procedimiento (WPS): Un WPS es un procedimiento de soldadura cualificada con un Registro de Cualificación (WPQR: Welding Procedure Qualification Report). En dicha especificación WPS deben indicarse claramente todas las variables o parámetros de soldeo.
2. Soldadura: Esta fase consiste en soldar una probeta respetando lo indicado en la especificación del procedimiento (WPS).
3. Ensayos: finalizado el proceso anterior, se realizan los ensayos requeridos por el código AWS D17.1.
4. Calificación del soldador: Si la probeta soldada cumple con los requisitos del código AWS D17.1, se emitirá un WPQ (Welder Performance Qualification), con lo que el soldador quedará calificado según el WPS empleado.

En el caso de que una planta MRO observe un defecto en una pieza y que en el manual de reparaciones no exista una instrucción de reparación, el centro reparador podrá proponer al fabricante una instrucción de reparación. El fabricante exigirá que el centro de mantenimiento sustente dicha reparación con la documentación necesaria, los ensayos que crea necesarios y que los soldadores y/o operadores de soldadura estén calificados.

Con objeto de sustanciar una nueva reparación, es necesario realizar las pruebas y ensayos que el fabricante requiera sobre una pieza scrap (pieza no servicable ni reparable). La

documentación generada se envía al fabricante para que valore la reparabilidad del componente.

### 3.3. Turbinas de gas en aviones

Un motor de reacción, reactor o jet es un tipo de motor que descarga un chorro de fluido a gran velocidad para generar un empuje de acuerdo a las Leyes de Newton. El esquema de un motor de reacción se muestra en la Figura 1. El aire se comprime en los álabes del compresor, se mezcla con el combustible y se quema en la cámara de combustión. Posteriormente, los gases expansionados mueven los álabes de la turbina, que proporcionan energía a la turbina y a los álabes de compresor, y finalmente pasan a la tobera de salida donde contribuyen al empuje.

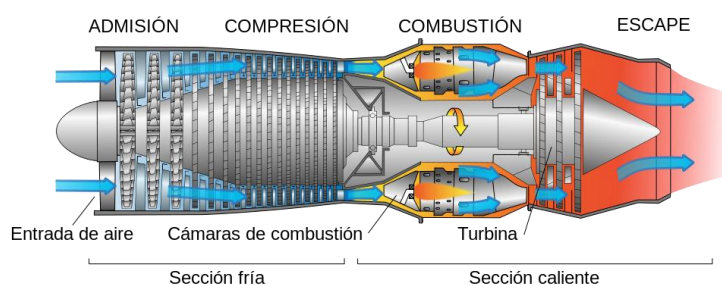


Figura 1: Esquema del paso del aire por un turborreactor (turbojet) [1]

Un motor de reacción, como él mostrado en la Figura 1, se divide en las siguientes partes:

**Compresor:** El compresor tiene como misión elevar la presión estática comprimiendo el aire de entrada. Los compresores se pueden dividir en centrífugos y axiales. Los compresores centrífugos constan, normalmente de uno o dos juegos de rotor-estator y tiene un área frontal grande. Los compresores axiales, en cambio, tienen varios juegos rotor-estator, lo que le proporciona una compresión mucho más elevada y progresiva. Estos últimos tienen poca área frontal y se puede conseguir un empuje más elevado.

**Cámara de combustión:** En la cámara de combustión tiene lugar la reacción entre el aire que proporciona el compresor y el combustible inyectado. En los turbofanes hay un flujo primario (él que combustiona) y un flujo secundario que se utiliza para expandir gases y para refrigerar (Figura 2). Existen, principalmente, dos tipos de cámaras de combustión: la cámara de combustión individual y la cámara de combustión anular única.

**Turbina:** La turbina se utiliza para obtener la energía mecánica de los gases de salida. La turbina funciona de modo inverso al compresor. Es la pieza más crítica en lo que se refiere a su diseño ya que puede llegar a trabajar a 50.000-90.000 rpm. Para su fabricación se utilizan superaleaciones que puedan soportar altas temperaturas y esfuerzos mecánicos cerca de los 900° (resistencia a la fluencia termomecánica).



**Tobera de salida:** La tobera de salida es la que propiamente expande los gases de salida. Tiene diferente configuración según la velocidad de vuelo del avión. Es convergente para velocidades supersónicas y divergente para subsónicas. Por esa razón en algunos aviones, especialmente en cazas como el Eurofighter, hay toberas de geometría variable que se adaptan automáticamente a la gran variedad de velocidades a las que vuelan esos aviones.

Entre los motores de reacción se incluyen los turbo reactores, turbofanes, cohetes, estatorreactores y motores de agua entre otros. En la Figura 2 se muestra de manera gráfica las diferencias entre un turbofan, un turbopropulsor (turbojet), un turbopropulsor (turbojet) y un turbojet (turbo reactor).

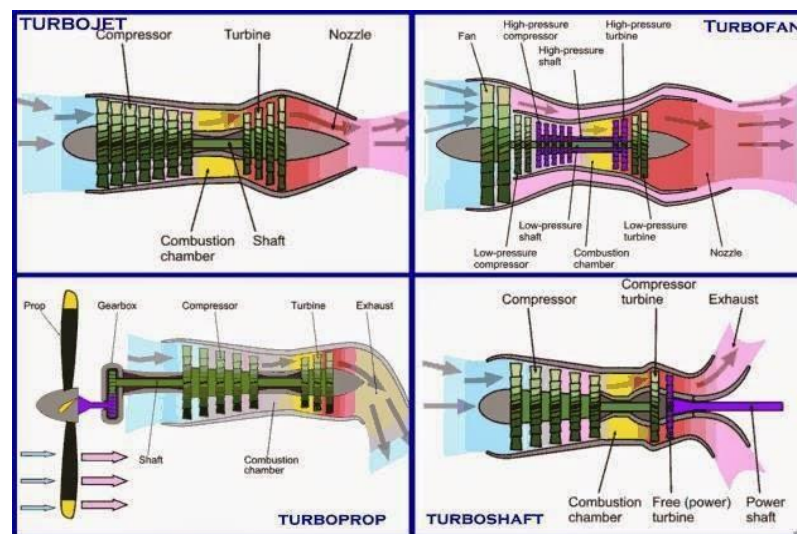


Figura 2: Diferencias entre un turboreactor, turbopropulsor, turbofan y turbopropulsor [2].

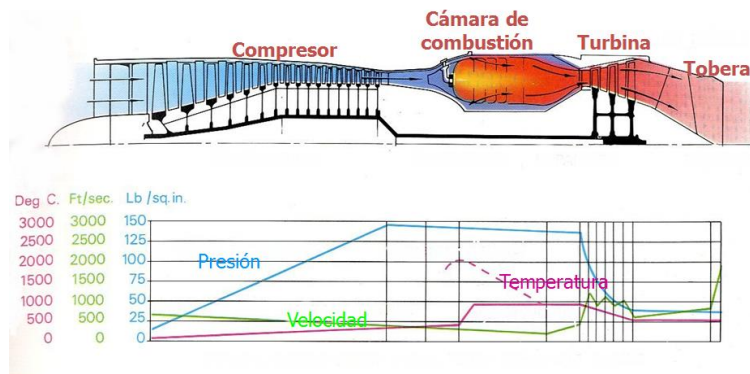
Un turboreactor (turbojet) consiste en una entrada de aire, un compresor de aire, una cámara de combustión, una turbina de gas (que mueve el compresor del aire) y una tobera. El aire entra comprimido en la cámara, se calienta y expande por la combustión del combustible y entonces es expulsado a través de la turbina hacia la tobera siendo acelerado a altas velocidades para proporcionar la propulsión.

El funcionamiento de un turbofan es el siguiente: el flujo primario penetra al núcleo del motor (compresores y turbinas) y el flujo secundario se deriva a un conducto anular exterior y concéntrico con el núcleo. Los turbofanes tienen varias ventajas respecto a los turboreactores: consumen menos combustible, lo que los hace más económicos, producen menor contaminación y menos ruido.

Los motores Turbopropulsores constan de una hélice delante del reactor impulsada por una segunda turbina, las etapas adicionales de esta turbina que mueve el compresor.

### 3.4. Selección de materiales metálicos en turbinas de avión

La selección de materiales para la fabricación de componentes del motor se basa al perfil de temperaturas y presiones del aire en cada zona del motor. En la Figura 3 se muestran los perfiles de presión y temperatura del aire a su paso por los diferentes módulos de un turboreactor. El perfil de temperaturas y presiones es similar para turbofanes, turboejes y turbohélices.



**Figura 3: Perfil de presión, velocidad y temperatura del aire a su paso por los diferentes módulos de un turboreactor.**

El aire entra por un gran conducto de entrada a la zona de compresores. En esta zona, un primer rotor con álabes comprime el aire (LPC: Low Pressure Compressor), un segundo rotor lo comprime aún más, y así sucesivamente hasta alcanzar de 10 a 40 veces la presión del aire de entrada en el compresor de alta presión (HPC). La temperatura del aire también aumenta a medida que se acerca a la cámara de combustión. Una vez el aire se encuentra en la última etapa del compresor de alta presión (HPC) pasa mediante difusores a las cámaras de combustión, donde un flujo constante de combustible en forma de spray, vapor o ambas cosas, es quemado a una presión casi constante a altas temperaturas.

La combustión provoca la expansión violenta de los gases producidos, en forma de chorro de alta presión, temperatura y velocidad. En su camino de salida, el chorro mueve una turbina que comparte eje con los compresores, de manera que parte de la energía del chorro hace girar los álabes del compresor, en general a más de 10.000 R.P.M. Por último, este chorro de gases se sale a la atmósfera a través de la tobera de salida en forma de fuerza propulsora.

Por lo tanto, se diferencian dos grandes zonas de materiales, por un lado las que operan en la zona fría (fan y compresores) y están afectadas por unas condiciones menos críticas que las que trabajan en la zona caliente (cámara de combustión y turbina).

En la zona del compresor suelen utilizarse aleaciones de titanio ya que tienen una baja densidad y su módulo y límite elástico y tenacidad a la fractura son suficientes para los



requisitos de presión y temperatura. Estas aleaciones también tienen que resistir a la fatiga (causada por cargas alternativas rápidas), deben tener buena resistencia al desgaste superficial (causado por impactos de agua, arena o pájaros) y ser resistente a la corrosión (importante en ambientes próximos al mar por la posible entrada de sales marinas en el motor). Por último, la densidad es un factor extremadamente importante: cuanto más ligero sea el avión menos combustible se necesitará. En un esfuerzo por reducir aún más el peso se han fabricado álabes de compresor de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP), cuya densidad es la mitad que la del titanio. Pero los CFRP no cubren todos los requerimientos de los álabes ya que en las pruebas de impacto de pájaros se dañan.

Por contrapartida los álabes de turbina están en la zona más caliente del motor y deben cumplir requisitos más exigentes. El combustible debe quemarse a la temperatura más alta posible para optimizar el rendimiento. Los primeros álabes de la turbina pueden llegar a soportar temperaturas de 950°C, por lo que se requieren materiales con una buena resistencia a la fluencia y a la oxidación. Para esta exigente aplicación se utilizan superaleaciones de base de níquel de composición y estructura compleja.

En la Figura 4 se encuentra un esquema de un turbofan y los materiales utilizados en cada zona y en la Figura 5 los materiales que se utilizaban en el motor del Concorde (olympus 593).

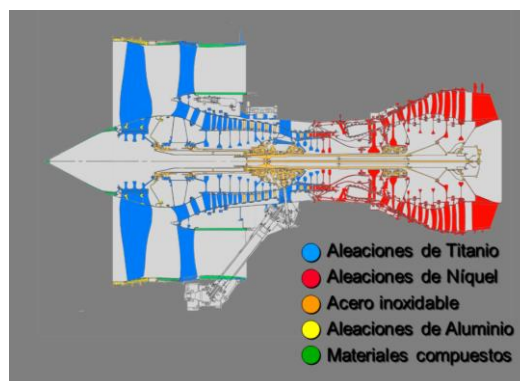


Figura 4: Esquema de la utilización de materiales en un turbofan

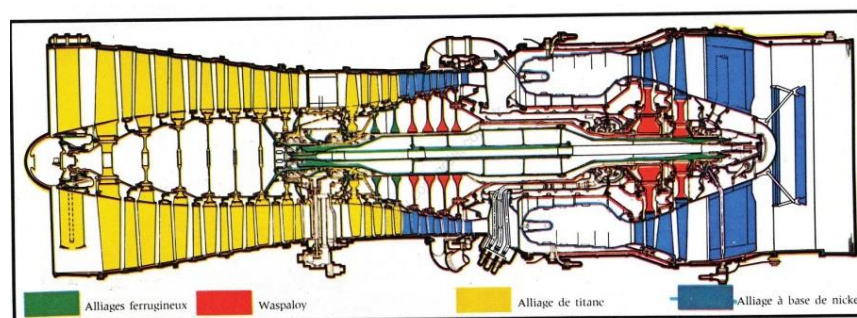


Figura 5: Esquema del motor RR-Snecma Olympus 593 del Concorde y la distribución de materiales [3].

### 3.4.1. Materiales para la fabricación de componentes de la zona del compresor.

Un compresor puede dividirse en los siguientes elementos:

- Fan (en el caso de Turbofan)
- El compresor de baja presión (LPC).
- El compresor de presión intermedia (IPC).
- El compresor de alta presión (HPC).

Excepto el Fan, compuesto únicamente por una parte móvil, el resto está formado por una parte móvil, el rotor, acoplado a un disco, y una parte fija, el estator, acoplado al carenado. Cada uno de estos binomios móvil-fijo se llama etapa de compresor.

Los componentes de la zona fría suelen estar fabricados con aleaciones de titanio y en los últimos años se están introduciendo los materiales compuestos por la mejora de sus prestaciones. Cada vez es menos frecuente utilizar aleaciones de aluminio y magnesio. La zona del HPC suele estar fabricada de acero inoxidable ya que las temperaturas son más elevadas al estar próximo a la cámara de combustión.

#### a) Aleaciones base aluminio.

El desarrollo de nuevas aleaciones y la necesidad de metales menos pesados que el acero llevó a su implantación masiva del aluminio en la aviación después de la Primera Guerra Mundial.

El aluminio es un metal ligero con una densidad de  $2.70 \text{ g/cm}^3$ , y por ello, aunque sus aleaciones tienen características mecánicas relativamente bajas comparadas con las del acero, tiene una buena relación resistencia-peso. Hasta hoy en día, las aleaciones de aluminio han sido los materiales más usados en aeronáutica por su baja densidad y adecuada resistencia.

Los principales inconvenientes que presentan las aleaciones de aluminio para su uso en motores de avión es la pérdida de propiedades a altas temperaturas (Figura 6), por lo que se suelen utilizar en componentes que no estén sometidos a elevadas temperaturas ni que requieran grandes prestaciones mecánicas como son las carcasas de fan (Figura 4). En la actualidad pocas piezas del motor están fabricadas de aluminio. Un ejemplo es la carcasa del fan del motor Engine Alliance GP7000 utilizado en el Airbus 380 y fabricada de Kevlar-aluminio.



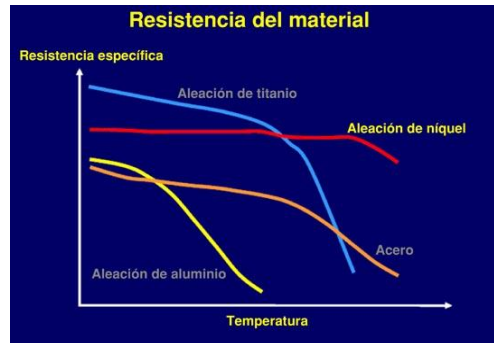


Figura 6: Variación de la resistencia específica de los materiales con la temperatura.

### b) Aleaciones base Magnesio

El magnesio es un metal ligero, con una densidad de  $1.74 \text{ g/cm}^3$ , que compite con el aluminio para aplicaciones que requieren metales de baja densidad, a pesar de su mayor precio. Sin embargo, el magnesio y sus aleaciones muestran una serie de desventajas que limitan su utilización. Por una parte la reactividad del magnesio es elevada, pero la estabilidad de sus óxidos es baja, por lo que su resistencia a corrosión es pequeña. Las características mecánicas son similares a las aleaciones de aluminio pero tienen baja resistencia a la termofluencia, fatiga y desgaste. Además, resultan aleaciones de difícil moldeo ya que en estado fundido el metal arde en contacto con el aire, y su transformación en frío resulta igualmente difícil al cristalizar el Mg en una estructura hexagonal densa que no favorece su deformación.

En motores más antiguos se suelen usar en cajas reductoras (Rolls Royce RB211) y en cárteres de entrada (Honeywell TPE331).

### c) Aleaciones base titanio

El contenido de titanio en turbinas aeronáuticas ha aumentado del 3% en peso en 1950 hasta aproximadamente el 33% de hoy en día, superando las previsiones que había.

El titanio es un metal relativamente ligero (densidad de  $4.54 \text{ g/cm}^3$ ). La resistencia del titanio es relativamente elevada ( $684 \text{ MPa}$  para el Ti de pureza 99.0%) por lo que sus aleaciones han desplazado a las aleaciones de aluminio la fabricación de componentes del compresor, a pesar de su mayor precio (alrededor de unas 5.7 veces superior).

Las fundiciones de titanio se suelen utilizar para fabricar los componentes estáticos más complejos, mientras que las piezas forjadas generalmente se utilizan en los componentes rotatorios.

Por ejemplo, el disco de fan, los discos y álabes de LPC del motor PW 4084 están fabricados con Ti6Al4V. Esta aleación se utiliza en las etapas del compresor más frías hasta una temperatura máxima de sobre  $315^\circ\text{C}$ . Ti-8Al-1Mo-1V se utiliza para los álabes de

motores militares. [4]

Las aleaciones 685 (Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si) y 829 (Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb-0.25Mo-0.3Si) se utilizan en motores civiles Rolls Royce RB211-535E4 en estado  $\beta$  térmicamente tratado para maximizar la resistencia a la fluencia.

La aleación 834 (Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.35Si-0.06C), por el contrario se utiliza en estado  $\alpha + \beta$ , con una microestructura del 5-15% equiaxial para optimizar tanto resistencia a la fluencia y la fatiga. La aleación 834 se utiliza como material en los discos compresor de las dos últimas etapas del compresor de media presión, y en las cuatro primeras etapas del compresor de alta presión en los motores Rolls-Royce Trent. Esta aleación pretende substituir a las aleaciones 685 y 829 que suele usarse en motores de fabricantes europeos por su mayor rango temperatura de servicio.

Ti-1100 (Ti-6Al-2.8Sn-4Zr-0.4Mo-0.4Si) es una aleación que está diseñada para ser utilizada en estado  $\beta$  tratada térmicamente. Esta aleación está fue desarrollada por Allison Gas para los motores 406 / GMA3007 / GMA2100 y se utiliza hasta una temperatura de 600°C

Ti6-2-4-2 (Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo) es la aleación de alta temperatura muy utilizada en EEUU, concretamente en motores a reacción. Una variante de esta aleación, Ti6-2-4-2S también está disponible comercialmente. La 'S' indica adición de 0,1 hasta 0,25% de Si para mejorar la resistencia a la fluencia. Se utiliza para los componentes giratorios tales como álabes, discos y rotores a temperaturas de hasta 540°C. También se utiliza en aplicaciones estructurales en compresores de alta presión (HPC) con temperaturas demasiado elevadas para Ti-6Al-4V (por encima de aproximadamente 315°C) [5].

Hoy en día, el límite máximo de temperatura para las aleaciones de titanio es de aproximadamente 540 °C. Esta limitación de la temperatura significa que en la zona más caliente del compresor, es decir, los discos y los álabes de las últimas etapas del compresor (HPC), deben ser fabricados con acero inoxidable o superaleaciones base Ni con casi el doble del peso. Esta diferencia de materiales entre etapas del compresor también ocasiona problemas asociados con el diferente comportamiento de dilatación térmica y las técnicas de unión de dos aleaciones tan diferentes. Actualmente el I+D de los fabricantes se está centrando en desarrollar un compresor hecho completamente de titanio. Para ello se requieren aleaciones de titanio que se puede utilizar a temperaturas de 600°C o superior. La Tabla 1 muestra la composición química y la temperatura máxima de servicio de las aleaciones de titanio mencionadas anteriormente.





Designación	Composición Química	Temperatura máxima de servicio (°C)
Ti64	Ti-6Al-4V	315
Ti811	Ti-8Al-1Mo-1V	400
Alloy 685	Ti-6Al-5Zr-0,5Mo-0.25Si	520
Alloy 829	Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb-0.25Mo-0.3Si	550
Alloy 834	Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0,5Mo-0.35Si-0.06C	600
Ti1100	Ti-6Al-2.8Sn-4Zr-0.4Mo-0.4Si	600
Ti6242	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	
Ti6242S	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.2Si	540

**Tabla 1: Composición química y temperatura máxima de servicio de aleaciones de titanio utilizadas para piezas de compresor.**

### c) Acero inoxidable

En las primeras turbinas de gas, los álabes del compresor estaban fabricados de acero inoxidable martensítico tipo 403 o 403 Cb. El principal problema de estos materiales es la baja resistencia a la corrosión causada por la humedad, sales y ácidos del aire de entrada. Para evitar que se corroyeran, GE desarrolló unos recubrimientos aluminizados para los álabes del compresor. Estos recubrimientos mejoraron también la resistencia a la erosión de los álabes.

Durante la década de 1980, GE presentó un nuevo material para los álabes de compresor, GTD-450, un acero inoxidable martensítico endurecido por precipitación. GTD-450 ofrece una mayor resistencia a la tracción, resistencia a la fatiga de alto ciclo (HCF) y resistencia a la fatiga a la corrosión, sin sacrificar la resistencia a la corrosión bajo tensión en comparación con el tipo 403. GTD-450 también posee una resistencia superior a los ambientes de sal ácidas que el 403, debido a una mayor concentración de cromo y la presencia de molibdeno [6].

#### 3.4.2. Materiales para la fabricación de componentes de la zona de combustión.

Nuevos materiales y procesos de fabricación se han desarrollado debido al aumento de las temperaturas de combustión y la necesidad controlar de las emisiones. Los materiales utilizados para la fabricación de las cámaras de combustión se caracterizan por soportar fatiga térmica. Estos materiales deben soportar el desgaste provocado por los repetitivos ciclos de expansión y contracción a elevada y a baja temperatura, sin sacrificar la resistencia a la oxidación / corrosión.[7]

Tradicionalmente las cámaras de combustión se han fabricado con chapa de superaleaciones de base níquel. Por ejemplo, Hastelloy X es un material con una gran resistencia a la fluencia por lo que se utilizó ampliamente desde 1960 hasta 1980. A continuación se introdujo Nimonic 263 ya que presenta una mejor resistencia a la fluencia.

Las superaleaciones base de níquel 617 y 230 también se utilizan frecuentemente en la fabricación de cámaras de combustión.

Posteriormente se desarrollaron superaleaciones de base cobalto como HA-188 ya que las temperaturas para la combustión se han ido incrementado en los últimos años. Esta superaleación base cobalto se ha introducido en varios componentes del módulo de combustión por su buena resistencia a la fluencia. La Tabla 2 muestra la composición química de los diferentes materiales utilizados en la fabricación cámaras de combustión [8].

Además de fabricar las cámaras con materiales que puedan soportar elevadas temperaturas, se les suele aplicar una barrera térmica (TBC: Thermal Barrier Coating). Los recubrimientos de barrera térmica (TBC) se utilizan para aislar los componentes de las turbinas de gas que están sometidos a temperaturas excesivas como cámaras de combustión y NGV. La baja conductividad térmica del TBC permite que actúe como pantalla térmica, por lo que las temperaturas de la superficie de los metales que recubren disminuyen. Una temperatura más baja en el metal permite mayor vida de los componentes al reducir las tensiones de fluencia y la fatiga, a la vez que reduce los índices de oxidación y corrosión. La zirconia estabilizada con itria ( $ZrO_2 - Y_2O_3$ ) o YSZ, como se conoce por sus siglas en inglés, es el material más usado como TBC. A mayores contenidos de  $Y_2O_3$  ofrecen una mejora en el potencial aislante, sin embargo se ha observado que por encima de un 8 mol.%  $Y_2O_3$  disminuye sus propiedades como TBC.

Nombre comercial	Composición química	Tipo de material
Hastelloy X	Ni22Cr1.5Co1.9Fe0.7W9Mo0.07C0.005B	Superalación base Níquel
Nimonic 263	Ni20Cr20Co0.4Fe6Mo2.1Ti0.4Al0.06C	Superalación base Níquel
617	54Ni22Cr12.5Co8.5Mo1.2	Superalación base Níquel
230	55Ni22Cr5Co3Fe14W2Mo0.35Al0.10C0.015B	Superalación base Níquel
HA 188	Co22Cr22Ni1.5Fe14W0.05C0.01B	Superalación base cobalto

**Tabla 2: Composición química de las superaleaciones más frecuentes en las cámaras de combustión.**

### 3.4.3. Materiales para la fabricación de componentes en la zona de turbina.

La turbina consta de un elemento fijo y otro móvil del mismo modo que el compresor. Pero a diferencia del compresor, la presión y la temperatura van descendiendo a medida que se avanza a lo largo de la turbina.

Los gases que salen de la cámara de combustión son dirigidos hacia el conjunto de alabes guía de la turbina (N.G.V., Nozzle Guide Vane). Estos tienen como misión dirigir el gas hacia los álabes de turbina con el ángulo correcto e incrementar su velocidad. El movimiento de los álabes provoca el movimiento de discos de turbina, que se encuentran unidos a un eje, donde parte de la energía que contiene es extraída para mover el compresor. En la Figura 7 se muestran los diferentes componentes de una turbina de forma esquemática.



La turbina está estructurada de manera análoga al compresor, de manera que cada parte del compresor es movida por su correspondiente parte de la turbina; así, la turbina de alta presión (HPT) impulsará al HPC, la turbina de presión intermedia (IPT) moverá al IPC, y la turbina de baja presión (LPT) hará lo propio con el LPC.

### 3.4.3.1. NGV (Nozzle Guide Vane)

Los álabes guía de turbina o “N.G.V.” (Nozzle Guide Vane) es la primera zona que se encuentran los gases a la salida de la cámara de combustión. Estas piezas tienen como función aumentar la velocidad de la corriente de gas caliente que sale de la cámara de combustión y dirigirla con el ángulo apropiado a los álabes de turbina. Estas piezas son las más expuestas a altas temperaturas (en algunos casos superan los 900°C) por lo tanto se fabrican con superaleaciones que soporten oxidación a alta temperatura, suelen estar refrigerados por aire y se recubren de TBC (al igual que las cámaras de combustión). En la Figura 8 se muestra un esquema del paso de gas caliente de los NGV a los álabes de turbina.

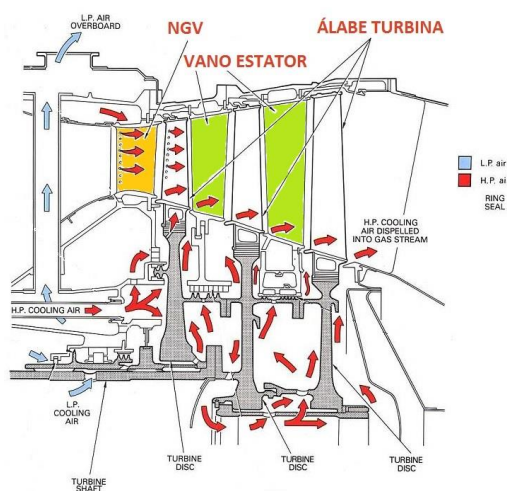


Figura 7: Esquema de una turbina

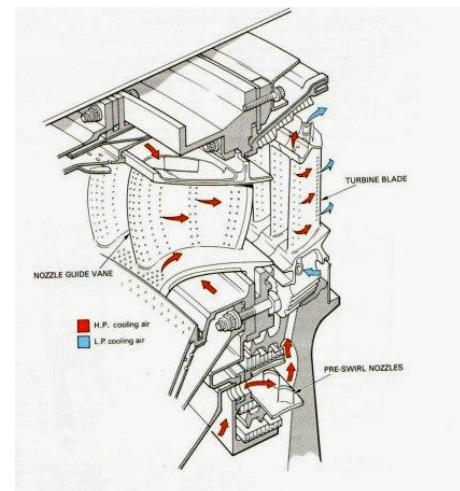


Figura 8: Esquema de como los NGV dirigen el gas de la cámara de combustión a los álabes de turbina.

### 3.4.3.2. Álabes del rotor

Los álabes de turbina son los componentes más críticos del motor, en cuanto a material se refiere, ya que trabajan bajo las condiciones más críticas posibles para un material:

- Deben soportar las cargas que se producen en la rotación, mientras se encuentran a unas elevadísimas temperaturas.
- Deben ser resistentes al choque térmico y a la fatiga.
- Deben ser resistentes a la termofluencia (tendencia al alargamiento gradual por el

efecto combinado del esfuerzo mecánico y la temperatura).

- Deben ser resistentes a la corrosión y a la oxidación.
- Deben poder adquirir formas complejas, mediante las técnicas de procesado actuales.

En la fabricación de los álabes se ha ido progresando, desde los primeros álabes policristalinos, pasando por álabes de granos columnares hasta la obtención de álabes monocristalinos (Figura 9). En este orden, se ha incrementado la resistencia a la fluencia notablemente y la temperatura de servicio, por lo que se ha aumentado el rendimiento de estas piezas. Esto, unido a la refrigeración interior del alabe y a la aplicación de TBC en su superficie (Figura 10) ha permitido aumentar las temperaturas a las que están sometidos, mejorando el rendimiento del motor [6].

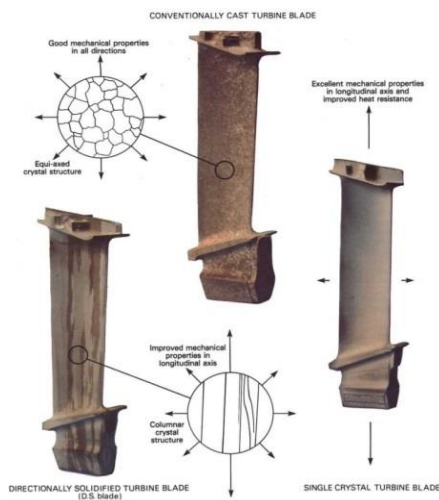


Figura 9: Diferentes métodos de fabricación de álabes de turbina.



Figura 10: Evolución de la refrigeración y aplicación de TBC en álabes de turbina.

### 3.4.3.2.1 Superaleaciones base Ni en forma de colada

La resistencia a la fluencia de los materiales es clave para la fabricación de álabes de turbina. En un principio se desarrollaron aleaciones base Ni forjadas aumentando el contenido de aluminio y titanio, ya que se observó una relación directa entre estos dos aleantes y el endurecimiento por envejecido,  $V_f$ , fluencia y el aumento de temperaturas de funcionamiento del motor.

Problemas con la forjabilidad de los componentes impidió el desarrollo de estas aleaciones. Esta situación llevó al desarrollo de la fundición de las superaleaciones a base de níquel.

La composición química de las superaleaciones de colada puede ser ajustada para obtener una buena resistencia a altas temperaturas ya que no había requisito forjabilidad. Además, los componentes fabricados a partir de fundición presentan más resistencia a altas



temperaturas que sus homólogos forjados, ya que su microestructura presenta tamaño de grano más grueso.

Nombre comercial	Composición química
IN 713	74.2Ni12.5Cr4.2Mo2Nb0.8Ti6.1Al0.1Zr0.12C0.01B
IN 100	60.5Ni10Cr15Co3Mo4.7Ti5.5Al0.06Zr0.18C0.014B
Rene 100	62.6Ni9.5Cr15Co3Mo4.2Ti5.5Al0.06Zr0.15C0.015B
MAR-M200	59.5Ni9Cr10Co12.5W1.8Nb2Ti5Al0.05Zr0.15C0.015B
MAR-M246	59.8Ni9Cr10Co2.5Mo10W1.5Ta1.5Ti5.5Al0.05Zr0.14C0.015B
IN 792	60.8Ni12.7Cr9Co2Mo3.9W3.9Ta4.2Ti3.2Al0.1Zr0.21C0.02B
M 22	71.3Ni5.7Cr2Mo11W3Ta6.3Al0.6Zr0.13C
MAR-M200+Hf	Ni8Cr9Co12W2Hf1Nb1.9Ti5.0Al0.03Zr0.13C0.015B

**Tabla 3: Superaleaciones base Ni de colada utilizadas en la fabricación de álabes de turbina.**

### 3.4.3.2.2 Superaleaciones base Ni con solidificación direccional (DS).

El primer mecanismo de fallo en álabes de turbina es la nucleación y crecimiento de cavidades a en los límites de grano transversales. La eliminación de los límites de grano transversales mediante solidificación direccional dio un paso importante en la capacidad de soportar altas temperatura de estas piezas de fundición.

El uso de superaleaciones DS mejoró la capacidad de los álabes a soportar altas temperaturas en aproximadamente 14-25°C en relación sus homólogos de fundición.

A principios de los años 1980, las superaleaciones DS operaban en las turbinas como por ejemplo DS MAR-M-200 + Hf.

Una evolución fue el CM247LC DS que es el resultado de optimizar la composición química del DS MAR-M-200 + Hf. Con ello se consiguió mejorar la microestructura de los carburos y mejorar la resistencia a la fisuración en los límites de grano, minimizar la formación de fases secundarias perjudiciales y para evitar un problema de inclusión HfO<sub>2</sub>. Pratt & Whitney también desarrollaron una superaleación similar DS PWA 1422. En la Tabla 4 se muestra la composición química de algunas superaleaciones DS.

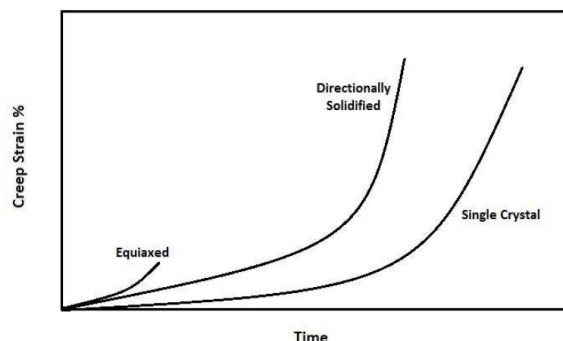
Nombre comercial	Composición química	Tipo de material
DS MARM-200+Hf	59.5Ni9Cr10Co12.5W2Hf1.8Nb2Ti5Al0.05Zr0.15C0.015B	Primera generación
CM247LC	61.7Ni8.1Cr9.2Co0.5Mo9.5W3.2Ta1.4Hf0.7Ti5.6Al0.01Zr0.07C0.015B	Primera generación
PWA1422	59.2Ni9Cr10Co12W1.5Hf1Nb2Ti5Al0.1Zr0.14C0.015B	Primera generación
DMD4	66.8Ni2.4Cr4Co5.5W6.5Re8Ta1.2Hf0.3Nb5.2Al0.07C0.01B	Tercera generación

**Tabla 4: Superaleaciones base Ni DS utilizadas en la fabricación de álabes**

### 3.4.3.2.3 Monocristales (SC: single Cristal)

Con la estructura de monocristal se eliminan todos los límites de grano de la microestructura: esta estructura se consigue mediante de un proceso de control de la solidificación. Una ventaja de estas superaleaciones en monocristal es que no necesitan la adición de aleantes reforzantes de los límites de grano como C, B, Zr and Hf. La ausencia de estos elementos ayudó a aumentar la temperatura de fusión del metal y en consecuencia su resistencia a

altas temperaturas. La Figura 11 muestra esquemáticamente la mejora en la resistencia a fluencia que presenta una de una superaleación monocristalina en comparación con una aleación DS o de colada.



**Figura 11: Representación esquemática de la fluencia relativa con el tiempo de materiales de colada (equiaxed), con solidificación direccional y monocristal [9].**

Las primeras superaleaciones monocristalinas en desarrollarse y aplicarse fueron las RR2000 y RR2060 de Rolls Royce, PWA1480 de Pratt & Whitney y ReneN4 de GE. Estas aleaciones proporcionaron un aumento de unos 20°C en la temperatura de trabajo de aleaciones DS existentes.

Los intentos para mejorar aún más la resistencia a alta temperatura de las superaleaciones SC se consiguió por medio del aumento de los elementos de aleación refractarios, como el Renio, lo que condujo al desarrollo de las superaleaciones PWA 1484, CMSX4, René N5, TUT92. Estas superaleaciones consiguieron una mejora de la temperatura de funcionamiento de 30°C respecto a las de primera generación.

El desarrollo de superaleaciones SC continuó con el objetivo de lograr otros 30°C mejora en la capacidad de la temperatura del metal sin comprometer la resistencia y con la ausencia de fases deletéreas en la microestructura. Esto produjo la aparición de las superaleaciones CMSX10, Rene-6, TMS75, TMS80, MC-NG, DMS4 y TMS-196.

Generación	Nombre Comercial	Composición química	Temperatura servicio (°C)
Primera generación	RR2000	62.5Ni10Cr15Co3Mo4Ti5.5Al1V	
	RR2060	63Ni15Cr5Co2Mo2W5Ta2Ti5Al	
	PW1480	62.5Ni10Cr5Co4W12Ta1.5Ti5Al 1060	1060
	Rene N4	62Ni9.8Cr7.5Co1.5Mo6W4.8Ta0.15Hf0.5Nb3.5Ti4.2Al	
	PWA1484	59.4Ni5Cr10Co2Mo6W3Re9Ta5.6Al	1120
Segunda generación	CMSX4	61.7Ni6.5Cr9Co0.6Mo6W3Re6.5Ta0.1Hf1Ti5.6Al	
	Rene N5	63.1Ni7Cr7.5Co1.5Mo5W3Re6.5Ta0.15Hf6.2Al0.05Co.004b0.01Y	
	TUT 92	68Ni10Cr1.2Mo7W0.8Re8Ta1.2Ti5.3Al	
	CMSX10	69.6Ni2Cr3Co0.4Mo5W6Re8Ta0.03Hf0.1Nb0.2Ti5.7Al	1135
Tercera generación	ReneN6	57.3Ni4.2Cr12.5Co1.4Mo6W5.4Re7.2Ta0.15Hf5.8Al0.05Co.004B	1110
	TMS 75	59.9Ni3Cr12Co2Mo6W5Re6Ta0.1Hf6Al	1115
	TMS 80	58.2Ni2.9Cr11.6Co1.9Mo5.8W4.9Re5.8Ta0.1Hf5.8Al0.5B3.0Ir	
	MC-NG	70.3Ni4Cr<0.2Co1Mo5W4Re5Ta0.1Hf0.5Ti6Al4.0Ru	
	DMS4	67Ni2.4Cr4Co5.5W6.5Re9Ta0.1Hf0.3Nb5.2Al	1140
	TMS 196	59.7Ni4.6Cr5.6Co2.4Mo5.0W6.4Re5.6Ta0.1Hf5.6Al5.0Ru	1150

**Tabla 5: Superaleaciones SC en álabes de turbina.**



### 3.4.3.3. Piezas rotatorias de las turbinas (discos)

Las propiedades requeridas a un disco son distintas al resto de partes de la turbina ya que están sujetos a una temperatura menor.

Son los encargados de extraer parte de la energía de la corriente de gas para convertirla en movimiento. Su única función es hacer rotar el compresor al cual se encuentra unido por medio de un eje, la turbina se halla sujeta a elevadas temperaturas y lo que es peor a elevadas cargas centrifugas que unido a la disminución de resistencia del material por causa de la temperatura hacen que este sea el elemento que más importancia tiene en cuanto a la elección de materiales, sin excepción se utilizan superaleaciones con elevado contenido de níquel y cromo.

Los discos de turbina son piezas críticas en los motores. Están sometidos a una fuerza centrífuga asociada a la rotación y a un gradiente de temperatura pronunciado entre la zona interior y exterior del disco. Los materiales con los que se fabrican deben soportar temperaturas elevadas y deben tener una resistencia muy buena a la fatiga y a la fluencia (creep). Estas propiedades son diferentes en las diferentes zonas del disco, en el centro del disco existe una alta tensión, del orden de 1000 MPa y temperaturas relativamente bajas. Aquí es conveniente tener un tamaño de grano fino, para lograr una buena resistencia a la tracción. En el exterior del disco las fuerzas de rotación son menores pero las temperaturas son muy elevadas por lo que son requeridas unas buenas propiedades a la fluencia y se necesita una estructura de grano gruesa. En la Tabla 6 se muestran los materiales utilizados en la fabricación de discos de turbina.

Nombre	Composición química	Métodos de obtención
A286	Fe15Cr25Ni1.2Mo2Ti0.3Al0.25V	Base Fe, ruta metalúrgica tradicional
718	Ni19Cr18.5Fe3Mo0.9Ti0.5Al5.1Cb 0.03C	Base Ni, ruta metalúrgica tradicional
IN 100	60Ni10Cr15Co3Mo4.7Ti5.5Al0.15C 0.015B 0.06Zr1.0V	Base Ni, ruta PM
Rene 95	61Ni14Cr8Co3.5Mo3.5W3.5Nb2.5Ti3.5Al	Base Ni, ruta PM
LC Astroloy	56.5Ni15Cr 15Co5.25Mo3.5Ti4.4Al	Base Ni, ruta PM
MERL-76	54.4Ni12.4Cr18.6Co3.3Mo1.4Nb	Base Ni, ruta PM
Rene88 DT	56.4Ni16Cr13Co4Mo4W0.7Nb3.7Ti	Base Ni, ruta PM
Udimet 720	55Ni18Cr14.8Co3Mo1.25W5Ti2.5Al0.035C	Base Ni, ruta metalúrgica tradicional y PM
Udimet 720LI	57Ni16Cr15Co3Mo1.25W5Ti2.5Al0.025C0.018B0.03Zr	Base Ni, ruta metalúrgica tradicional y PM

**Tabla 6: Materiales frecuentes en la fabricación de discos de turbina**

En todos los casos se utilizan superaleaciones de elevado contenido de níquel y cromo, aunque en un principio, se utilizó acero inoxidable con buenos resultados. Por ejemplo, la aleación base hierro el A286 y la base níquel Inconel 718 se han utilizado durante más de 25 años en discos de turbinas.

Este tipo de aleaciones se han producido a través de la ruta metalúrgica de lingote convencional, pero en los últimos años se están utilizando procesos de pulvimetalurgia (PM)

para su obtención ya ofrecen un aumento de resistencia del 10%, y por consiguiente un aumento de la velocidad de rotación, que se traduce en un aumento considerable de la eficiencia. Varios motores fabricados por General Electric y Pratt & Whitney están utilizando discos de turbina fabricados mediante pulvimetalurgia.

PM se utiliza esencialmente para superaleaciones de base de níquel como IN100 o Rene95 que son difíciles de forjar por métodos convencionales. Otros ejemplos de superaleaciones que se fabrican a partir de PM son LC Astroloy, MERL 76, IN100, Rene95 y Rene88

Las ventajas de los procesos PM son:

- Método para conformar superaleaciones como IN-100 o Rene95 difíciles de forjar por métodos convencionales.
- Mejora la homogeneidad y minimiza la segregación en aleaciones complejas de base níquel.
- Permite un mayor control de la microestructura y mejor uniformidad de propiedades en piezas en comparación con piezas de colada. Se pueden obtener tamaños de grano más finos.
- Permite obtener geometrías casi finales, por lo tanto, requiere de menos materia prima y reduce el costo de mecanizado en comparación con el mecanizado de lingote convencional.

#### **3.4.3.4. Vanos del estator**

Los vanos del estator debido a su condición estática, no tienen que soportar las elevadas sollicitaciones mecánicas que imponen las rotaciones de los ejes. Por tanto, los materiales se eligen en función de las temperaturas que tienen que soportar. Se emplean aleaciones base Níquel, con diseños que permitan estar refrigeradas y pueden llevar algún recubrimiento cerámico.

En esta sección introductoria se ha querido mostrar la gran variedad de materiales metálicos que se utilizan para la fabricación de un motor de avión. Los motores de avión son un claro ejemplo de la importancia de la selección de materiales.

### **3.5. Proceso de overhaul en motores**

Cada cierto tiempo los motores necesitan de un servicio de mantenimiento preventivo y correctivo. Las revisiones periódicas de mantenimiento se suelen realizar en función de las FFH (Factored Fired Hours), que es una forma de calcular el tiempo que tiene que pasar entre inspecciones

Los motores se someten a un overhaul o revisión completa cuando por las FFH es





necesario o se detecta en algunas de las revisiones menores alguna avería, fallo, FOD (Foreign Object Damage / Daño por objeto extraño) o DOD (Domestic Object Damage / Daño por un objeto desprendido). La revisión overhaul consiste en la revisión de todas y cada una de las piezas desmontadas incluida la tornillería.

Durante estos procesos de mantenimiento cada componente es inspeccionado y examinado en busca de señales de desgaste, fallo o avería. Aunque un defecto pueda parecer mínimo y no comprometido, puede reducir la eficacia, algo que en términos logísticos seguramente resulte muy caro.

Un overhaul de un motor turbina cuenta con los siguientes pasos:

- Planificación de bajada de motor. Operación importante para el cliente ya que tienen una aeronave sin operar. Los centros MRO pueden dejar motores en leasing.
- Desmontaje de todas las piezas.
- Limpieza de todas las piezas.
- Inspección de componentes.
- Reparaciones y sustituciones de componentes.
- Verificación de las reparaciones.
- Montaje de los componentes.
- Prueba Final en banco de prueba.
- Informe y documentación asociada.
- Envío del motor al cliente.

Durante el proceso de inspección se determina si las piezas están en buen estado, si pueden ser reparadas o se deben substituir por unas nuevas. La substitución de piezas por otras nuevas puede deberse a que la pieza ha llegado a su vida útil límite (por ejemplo los discos de turbina), o bien porque no existe reparación posible o por que la reparación no es rentable económicamente. En la Figura 12 se muestra un esquema del proceso que llevan las piezas de motor en una instalación de MRO.

Entre las reparaciones más habituales se encuentran la reparación de grietas por soldadura, cambio de insertos dañados, recrecimiento de pestañas por proyección térmica, galvanizados o amolado de desgastes, entre otras.

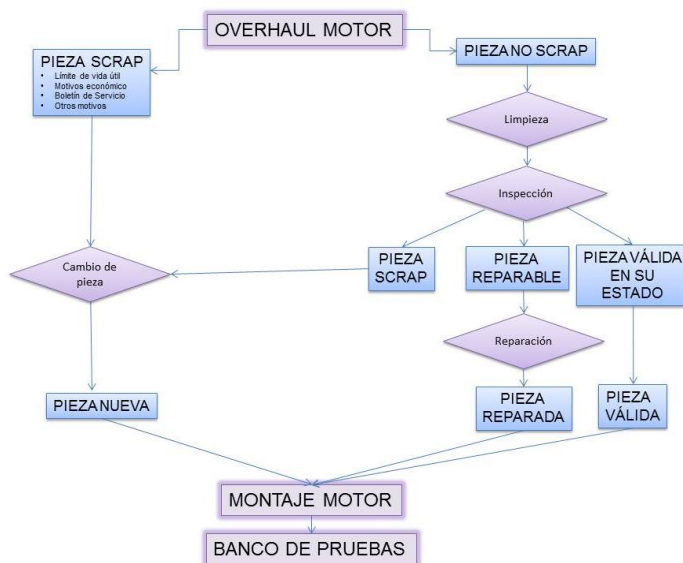


Figura 12: Esquema del proceso de overhaul en un taller de mantenimiento de motores de avión.

### 3.6. Reparaciones por soldadura en piezas de motor.

Durante el proceso de inspección pueden detectarse grietas en cualquier pieza del motor y, si el manual del fabricante considera que la grieta está dentro de los límites de reparabilidad, posiblemente será necesario soldar por soldadura. Para ello será necesario que los soldadores estén acostumbrados y calificados a soldar materiales tan diferentes como superaleaciones base níquel o aleaciones de aluminio. Las reparaciones por soldadura de piezas de motor son muy habituales en los talleres de mantenimiento.

La soldadura es un proceso de unión entre materiales por la acción del calor, con o sin aporte de material nuevo, dando continuidad a los elementos unidos. Es necesario suministrar calor hasta que el material de aporte funda y una ambas superficies, o bien lo haga el propio material de las piezas. Para que el material de aporte pueda realizar correctamente la soldadura es necesario que «moje» a los materiales que se van a unir, lo cual se verificará siempre que las fuerzas de adherencia entre el material de aportación y las piezas que se van a soldar sean mayores que las fuerzas de cohesión entre los átomos del material añadido.

Los efectos de la soldadura resultan determinantes en la funcionalidad del componente. El metal de aportación y las consecuencias derivadas del suministro de calor pueden afectar a las propiedades del componente soldado. Deben evitarse porosidades, grietas y deformaciones. El calor de la soldadura causa distorsiones que pueden reducirse al mínimo eligiendo de modo adecuado los elementos de sujeción mediante utillaje y estudiando previamente la secuencia de la soldadura. También puede suceder que la zona afectada por el calor quede dura y quebradiza. Para evitar estos efectos indeseables, las instrucciones de reparación de los manuales de los fabricantes indican realizar tratamientos térmicos de



precalentamiento o posteriores.

### 3.6.1. Clasificación de los tipos de soldadura

Los procesos de soldadura se clasifican según la AWS tal y como muestra la Figura 13.

En la industria aeronáutica la naturaleza de los procesos para soldar se caracterizan por la baja producción de unidades, el alto coste unitario de los componentes, la fiabilidad extrema y las severas condiciones del servicio. Estas características obligan a utilizar procesos de soldadura costosos y con fuentes de calor muy concentradas tales como la soldadura con arco o plasma, con láser y con haz de electrones.

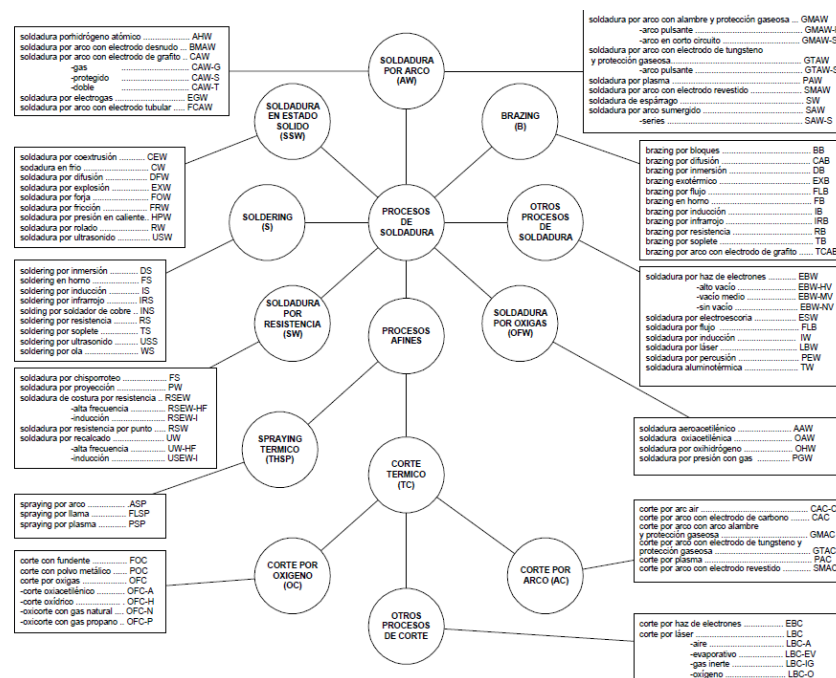


Figura 13: Esquema de los procesos de soldadura según la AWS [10].

Los procesos de soldadura más comunes en el mantenimiento y reparación MRO son los siguientes:

- Soldadura por Arco con Electrodo de Tungsteno y Protección Gaseosa (GTAW)
- Soldadura por Plasma (PAW)
- Soldadura por Haz de Electrones (EBW)
- Soldadura por brazing en horno (BF)
- Soldadura brazing por antorcha (TB)
- Soldadura por resistencia de puntos (RSW)

El alcance de este trabajo se centrará en los procesos de soldadura en atmósfera inerte con electrodo de tungsteno (GTAW o TIG), ya que actualmente es el proceso más utilizado para reparaciones de grietas, y soldadura orbital para recrear dimensiones mediante la deposición de metal fundido.

### 3.6.2. Soldadura GTAW o TIG

El proceso de soldadura en atmósfera inerte con electrodo no consumible GTAW, también llamado TIG (Tungsten Inert Gas), apareció por primera vez en EEUU en 1942. Su primera utilización fue para soldar magnesio en atmósfera protectora de helio.

Este proceso utiliza como fuente de energía un arco eléctrico que se establece entre un electrodo no consumible y la pieza a soldar, mientras un gas inerte protege el baño de fusión. El material de aporte, cuando se utiliza, se aplica por medio de varillas. La Figura 14 muestra esquemáticamente los principios del proceso TIG.

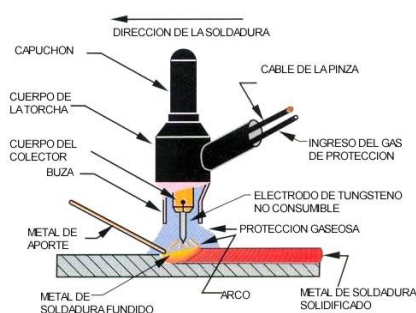


Figura 14: Esquema del proceso de soldadura TIG.

Este proceso permite para soldar todos los materiales, incluidos el aluminio y el magnesio y materiales sensibles a la oxidación como el titanio, circonio y sus aleaciones. Se obtienen soldaduras de alta calidad y con una elevada pureza metalúrgica, exentas de defectos y buen acabado superficial siempre y cuando el operario muestra la suficiente pericia en el proceso. Permite controlar la penetración y la posibilidad de efectuar soldaduras en todas las posiciones. El principal inconveniente es la baja tasa de deposición que presenta.

Las ventajas de esta técnica de soldadura frente a otras son:

- Permite la soldadura de la mayoría de los metales y aleaciones
- Evita la utilización de fluxes decapantes
- Fuente de calor muy concentrada,
- Baño de fusión muy calmado (no hay turbulencias)
- Soldadura es de alta calidad
- Mínimo desgaste del electrodo refractario por lo que no hay desprendimiento de humos o vapores nocivos.

Por el contrario, los inconvenientes que presenta son:

- Fuerte emisión de radiación ultravioleta.
- Mayor destreza del soldador en comparación con otras técnicas.
- Menor productividad
- Mayor coste al final del proceso.
- Equipo más complejo y costoso que para otros procesos de soldadura.
- No se recomienda su uso en lugares con corrientes de aire.



### 3.6.2.1. Equipamiento

Para llevar a cabo soldaduras TIG es necesario un equipo básico como el que se muestra en la Figura 15.

El equipo consta de:

- Generador de corriente CC y/o CA de característica descendente.
- Generador de alta frecuencia o de impulsos, que mejora la estabilidad del arco en caso de empleo de CA, y facilita el cebado.
- El circuito de gas inerte.
- Antorcha.
- Circuito de refrigeración (agua o aire)
- Equipo de control.

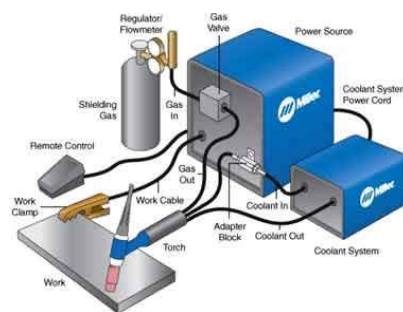


Figura 15: Equipamiento básico para soldadura TIG o GTAW

La pinza porta electrodo termina formando una tobera por donde sale el gas, sobresaliendo por su centro el electrodo no consumible. Tienen la misión de conducir la corriente y el gas de protección hasta la zona a soldar. Pueden ser de refrigeración por aire o agua. Las primeras se utilizan para soldar espesores finos, que no requieren grandes intensidades, y las de agua se recomiendan para trabajos que exijan intensidades superiores a los 150-200A. En estos casos la circulación de agua por el interior del portaelectrodos evita el sobrecalentamiento del mismo.

Las partes más importantes de la antorcha son (Figura 16):

- **Pinza portaelectrodos**

El electrodo de tungsteno, que transporta la corriente hasta la zona a soldar, se sujeta rígidamente mediante una mordaza alojada en el cuerpo de la antorcha. Cada portaelectrodos dispone de un juego de mordazas, de distintos tamaños, que permiten la sujeción de electrodos de diferentes diámetros.

- **Tobera o boquilla**

El gas de protección llega hasta la zona a soldar a través de una tobera o copa cerámica,

sujeta en la cabeza de la antorcha. La tobera tiene la misión de dirigir y distribuir el gas protector sobre la zona de soldeo. A fin de acomodarse a distintas exigencias de consumo, cada antorcha va equipada con un juego de toberas de diferentes diámetros.

Hay que tener en cuenta que el electrodo de tungsteno debe estar perfectamente centrado dentro de la tobera para que el chorro de gas inerte proteja bien el baño de fusión (Figura 17).



Figura 16: Piezas principales de un portaelectrodos TIG con difusor de gas y sin difusor de gas



Figura 17: Ejemplo del montaje de una antorcha con difusor de gas

### 3.6.2.2. Material de aporte

Como material de aporte se utilizan las varillas con un diámetro en función de los espesores de las piezas a unir. Las varillas son metálicas sin revestimiento, por lo que a diferencia de otros procesos de soldadura, no se generan escorias ni se forman proyecciones. Con la finalidad de obtener uniones sin defectos, las varillas deben mantenerse libre de contaminaciones ya sea en forma de humedad, polvo o suciedad.

Es importante que la parte fundida de la varilla esté siempre lo suficientemente cerca del baño de fusión para que lo cubra el gas de protección. Como la soldadura TIG se realiza en una atmósfera inerte que no provoca reacciones en el baño, el material de aportación deberá tener básicamente una composición química similar a la del material de base.

No es siempre necesario utilizar material de aporte cuando se sueldan piezas de menos de 3 mm de espesor. En estos casos basta con una preparación de bordes rectos o con bordes levantados y fundir el metal base con el arco.



### 3.6.2.3. Gases de protección

Los principales gases inertes utilizados en la soldadura TIG son los siguientes:

- Argón (Ar): Ofrece una buena estabilidad del arco y facilidad de cebado. Además ofrece una baja conductividad térmica, lo que favorece a la concentración de calor en la parte central del arco, originándose por ello una penetración muy acusada en el centro del cordón.
- Helio (He): Este gas es muy poco utilizado en Europa. Es necesario aplicar mayor tensión en el arco, consiguiéndose una penetración menor y cordones más anchos. Por otro lado, su uso exige emplear mayor caudal de gas que si se empleara el argón.
- Mezcla de Argón-Helio: Empleando la mezcla de ambos gases se obtienen características intermedias. No obstante, sólo se suele emplear para el soldeo del cobre, dado que esta mezcla de gases contribuye a la figuración en frío del acero.
- Mezcla de Argón-Hidrógeno: Su uso aumenta el poder de penetración de la soldadura. Se restringe su uso para soldar aceros inoxidable, dado que aumenta la posibilidad de la fisuración en frío para otros aceros.

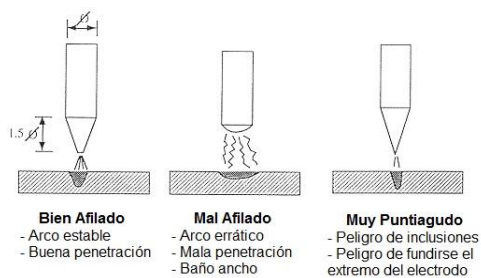
El caudal de gas no debe ser demasiado elevado ya que se corre el riesgo de que se arrastre aire y se produzcan oxidaciones. El caudal de protección de la antorcha suele oscilar entre 5-15 l/min.

### 3.6.2.4. Electrodo

La misión del electrodo en el proceso TIG es únicamente la de mantener el arco sin aportar material al baño de fusión. Por este motivo y para evitar su desgaste se fabrican con materiales con un elevado punto de fusión (>4.000 °C).

El material más común para la fabricación electrodo es el Tungsteno puro o aleado. Los elementos aleantes favorecen ciertos aspectos, como el encendido del arco, mejorar su estabilidad y aumentar el punto de fusión del electrodo. Los aleantes más comunes son el torio (Th), Zirconio (Zr) o Cerio (Ce).

Los electrodos se presentan en forma cilíndrica con una gama de diámetros de 1,6; 2,4 y 3,2 mm. Cabe destacar la importancia del afilado en el extremo del electrodo, ya que influye en la calidad de la soldadura (Figura 18). En general, es preferible seleccionar un electrodo tan fino como sea posible, con objeto de concentrar el arco y obtener de este modo un baño de fusión reducido.



**Figura 18: Influencia del afilado del electrodo en la calidad de la soldadura**

En la Tabla 7 se muestran los electrodos más frecuentemente utilizados y la clasificación de códigos y colores según las AWS.

Nomenclatura AWS	Aleación	Contenido óxido	Código color
EWTh-2	2% thorio	1.7-2.2% ThO2	[Color rojo]
EWCe-2	2% Cerio	1.8-2.2% CeO2	[Color gris]
EWLa-1.5	1.5% Lanthanio	1.3-1.7% La2O3	[Color amarillo]
EWLa-1	1.5% Lanthanio	0.8-1.2% La2O3	[Color negro]
EWZr-1	Zirconio	0-15-0.40% ZrO2	[Color marrón]
EWP	Puro	Ninguno	[Color verde]

**Tabla 7: Nomenclatura y código de colores de electrodos Tig según la AWS.**

El Thorio es el aleante más frecuentemente utilizado, ya que facilita el cebado y la estabilidad de arco, además de aumentar la durabilidad. Debido a su radioactividad se está desaconsejando su utilización. La especificación AWS A5.12 indica: “El Thorio es un material de baja radioactividad y presenta riesgos a la exposición externa e interna. Si es factible una alternativa debe ser usada. Durante el afilado de la punta se genera un polvo radioactivo, con el consiguiente riesgo de exposición interna.”

### 3.6.2.5. Tipos de corriente eléctrica

El proceso TIG puede utilizarse tanto con corriente continua como con alterna. La elección de la clase de corriente y polaridad se hará en función del material a soldar. La influencia del tipo de corriente eléctrica en la calidad de la soldadura se muestra en la Tabla 8.

#### a) Corriente continua

La polaridad recomendada en corriente continua es la directa, ya que si se suelda con polaridad inversa se tiene que utilizar intensidades tan bajas para que no se sobrecaliente el electrodo que resulta impracticable el soldar.

Lo habitual en TIG es emplear corriente continua en polaridad directa, debido a que los electrodos con esta configuración alcanzan menor temperatura, y por lo tanto se degradan menos.

- Polaridad directa (electrodo negativo):

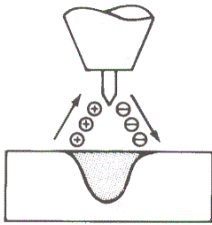
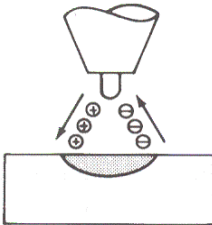
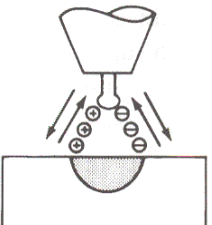







Se produce un mayor desprendimiento de calor en la pieza y una penetración más elevada, debido al bombardeo sobre la pieza de los electrones procedentes del electrodo negativo (cátodo). La tensión de arco es mayor que en polaridad inversa.

- Polaridad inversa (electrodo positivo):

Se produce mayor desprendimiento de calor en el electrodo y menor penetración. El electrodo corre el riesgo de fundirse. La tensión de arco es menor que en polaridad directa.

Tipo de corriente	Corriente continua		Corriente alterna
Polaridad	Directa	Inversa	
Flujo de electrones e iones			
Aspecto de la penetración			
Acción decapante	No	Si	Si. Una vez durante el semiciclo positivo
Balace calórico (aproximado)	70% en la pieza 30% en la punta del electrodo	30% en la pieza 70% en la punta del electrodo	50% en la pieza. 50% en la punta del electrodo
Penetración	Profunda y estrecha	Ancha y menos profunda	Media
Comportamiento del electrodo	Excelente. Ej. 400 A; 3,2 mm	Pobre Ej. 30 A; 3,2 mm	Buena Ej. 225 A; 3,2 mm

**Tabla 8: Influencia del tipo de corriente y polaridad en la calidad de la soldadura.**

Las aleaciones ligeras, como las de aluminio, que se recubren de un óxido refractario, solo es posible soldarlas si se usa corriente continua con polaridad inversa, ya que los electrones al dirigirse hacia el electrodo positivo rompen la capa de óxido proporcionando un baño de soldadura limpio y brillante. En este caso el electrodo no puede soportar mucha intensidad. En la práctica para estas aleaciones ligeras se emplea corriente alterna.

### b) Corriente Alterna

Con corriente alterna el sentido de la corriente se invierte en cada alternancia y el electrodo es sucesivamente negativo y positivo.

Para el caso de uso de Corriente Alterna (CA) se obtienen unos efectos intermedios en el aspecto del cordón, además de precisar de un generador de alta frecuencia para estabilizar el arco.

### c) Arco Pulsado

Una variante de este proceso es el llamado TIG pulsado, donde la corriente que se aplica varía entre dos niveles a frecuencias que dependen del tipo de trabajo, consiguiéndose

mejorar el proceso de cebado. Para este caso el tipo de corriente hay que emplea emplear CA. El TIG pulsado tiene aplicación sobre todo para pequeños espesores.

### 3.6.2.6. Distancia del electrodo

La distancia que separa el electrodo de la pieza influye en el mantenimiento del arco eléctrico. Por lo tanto es muy importante controlar el tramo de electrodo que sobresale de la tobera de la pinza, recomendándose:

- 5 mm como máximo de salida del electrodo fuera de la tobera.
- 5 mm como máximo para la distancia de la punta del electrodo a la pieza.

### 3.6.2.7. Ángulo de inclinación de la pinza porta-electrodos.

Lo ideal es trabajar con un ángulo de  $90^\circ$ , es decir, con la pinza totalmente perpendicular a la pieza. A efectos prácticos se puede admitir una inclinación entre  $75^\circ$  y  $80^\circ$ , a fin de facilitar el trabajo y el control visual del cordón.

En todo caso, hay que recalcar la idea que una mayor inclinación va en detrimento de la protección de la soldadura, dado que se produce una peor incidencia de la campana de gas protector sobre el baño.

### 3.6.2.8. Afilado del electrodo

El afilado del extremo del electrodo es un factor muy importante para la estabilidad del arco eléctrico. Durante el proceso de afilado se debe tener la precaución de dejar que las estrías queden perpendiculares a la corriente. Con ello se conseguiría que el arco salga más centrado. Si no se corre el peligro de que el arco resulte errático durante la soldadura.

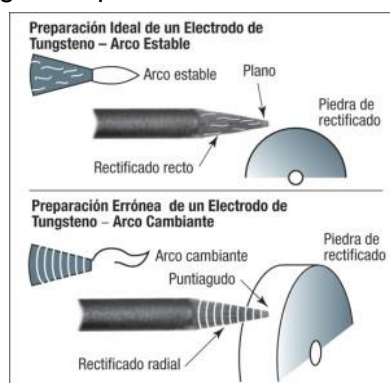


Figura 19. Afilado correcto del electrodo de tungsteno [10]



## 4. CALIFICACIÓN DE SOLDADORES

### 4.1. Procedimiento experimental

Los fabricantes de motor y los clientes de un centro de mantenimiento exigen una capacitación de los soldadores en las técnicas de soldadura por fusión. La mayoría de fabricantes solicitan que los soldadores estén calificados según la AWS D17.1 (Figura 20).



Figura 20: Código AWS D17.1 [11]

Las fases que hay que seguir para poder calificar a un soldador según la AWS D17.1 son las siguientes:

1. Realización de un WPS (Welding Procedure Specification / Especificación del Procedimiento de Soldadura): El WPS es un procedimiento escrito donde quedan reflejadas las indicaciones para ejecutar las uniones soldadas de una forma concreta.
2. Proceso de Soldadura: El soldador realiza la calificación en una probeta respetando lo indicado en el WPS.
3. Proceder con los ensayos requeridos por el código AWS D17.1 y realizar un WPQR (Welding Procedure Qualification Record / Registro de Calificación del Proceso) de las probetas soldadas. El WPQR es un documento que reúne los resultados de ensayar las probetas. Es el documento que valida y respalda el WPS.
4. Realizar un WPQ (Welder Performance Qualification / Calificación del Desempeño del Soldador) al soldador en caso de que los resultados de los ensayos determinados en el WPQR sean aceptables. WPQ es el documento que determina el desempeño o habilidad de los soldadores y se indica el rango de calificación en el que están homologados para soldar.

### 4.1.1. Probetas para calificar soldadores en centros MRO.

Una soldadura en una chapa a tope en posición horizontal 1G será representativa para la calificación de soldadores en un una organización de mantenimiento MRO, salvo que el fabricante indique lo contrario en su Manual de Reparaciones. La soldadura de una chapa a tope en posición 1G se muestra en la Figura 21. El resto de posiciones de soldadura definidas por la AWS están ilustradas en el ANEXO A.

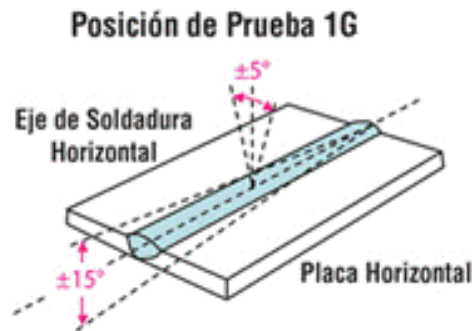


Figura 21: Soldadura de chapa a tope en posición 1G

Las dimensiones de la probeta para la homologación de soldadores especificadas en el código AWS D17.1 se muestran en la Figura 22 y en la Tabla 9.

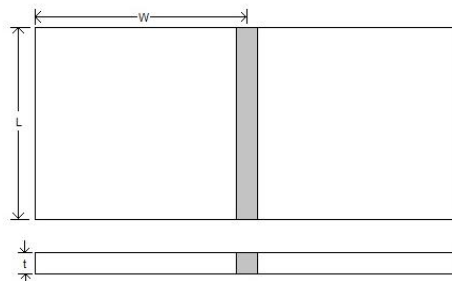


Figura 22: Dimensiones probeta para calificación de soldadura para posición 1G (chapa a tope)

Espesor metal base (mm)	Dimensiones mínimas (mm)	
	W	L
t ≤ 1,6	50	125
t > 1,6	75	200

Tabla 9: Dimensiones de la probeta fabricada a partir de chapa

En la Tabla 10 se muestran las posiciones calificadas con una probeta de ensayo en forma de chapa soldada a tope y en posición 1G. Según el código AWS D17.1, los soldadores que se califiquen con este tipo de ensayo estarán calificados para soldar materiales del mismo grupo (punto 4.1.3.1) y con el mismo proceso de soldadura en posición 1F y 2F para chapa en ángulo y 1G y 1F en tubos y tuberías.



SOLDADURA ENSAYO			POSICIÓN CALIFICADA															
Forma	Tipo soldadura	Posición	CHAPA								TUBO							
			A tope				En ángulo				A tope				En ángulo			
			1G	2G	3G	4G	1F	2F	3F	4F	1G	2G	5G	6G	1F	2F	4F	5F
Chapa	A tope	1G	X				X	X			X				X			

Tabla 10: Posiciones calificada con una prueba de soldadura en chapa a tope 1G.

En este proyecto se considerara que el término “soldadura a tope” se corresponde con el anglicismo “Groove Weld” y “soldadura en ángulo” con “Fillet Weld”.

En el caso de necesitar una calificación en otra posición se realizará de acuerdo a la norma AWS D17.1. En el ANEXO B se encuentran todas las correlaciones entre la posición de la soldadura de ensayo y las posiciones calificadas. En el caso de operadores de soldadura cualquier posición de soldadura certifica todas las demás posiciones.

Existen otras variables del proceso de soldadura que se deben correlacionar entre la soldadura de ensayo y la calificación del soldador. Entre las variables se encuentran el tipo de corriente o si la penetración es completa o parcial. En el ANEXO C se muestra la correlación entre las condiciones de la probeta soldada y las condiciones calificadas.

El rango de espesores calificados es de 0,67t a 4t, siendo t el espesor de las probetas soldadas a tope.

#### 4.1.2. Elaboración y calificación de procedimientos de soldadura

Para poder calificar a un soldador mediante el código AWS D17.1 es necesario crear un WPS de calificación de probetas. En un WPS se reflejan todas las variables esenciales y las que se consideren necesarias de las no esenciales. En el ANEXO D se muestra el WPS utilizado para calificar a los soldadores en este proyecto.

Las variables esenciales son aquellas en las que un cambio afecta en las propiedades mecánicas de la soldadura. Cualquier cambio requiere una nueva calificación del WPS. Las variables esenciales en los procesos de soldadura son las siguientes:

- Proceso de soldadura: GTAW, SMAW, MIG...
- Composición de metal base: Grupo de clasificación del material.
- Espesor del metal base.
- Posición de soldadura: 1G, 2G, 3G, etc.
- Forma del metal base: Chapa o tubo.
- Tipo de soldadura: A tope o en ángulo.
- Tipo de protección utilizada: Gas, flux...
- Tipo de electrodo y geometría: EWP, EWCE-2...
- Material de aporte.
- Diseño de la junta.
- Características eléctricas: Tipo de corriente, Intensidad, Voltaje...

- l) Tratamiento térmico previo a la soldadura.
- m) Tratamiento térmico posterior a la soldadura.

Las variables no esenciales son aquellas en que un cambio no afecta las propiedades mecánicas de la soldadura y por lo tanto se puede hacer sin recalificar el WPS, pero debe documentarse el cambio.

#### **4.1.2.1. Elaboración de un nuevo WPS**

Los pasos a seguir cuando no cuando no existe un WPS calificado para una soldadura determinada son los siguientes:

1. Realización de un WPS preliminar (pWPS) utilizando el formato del ANEXO D. El WPS debe incluir las operaciones necesarias para la preparación de la probeta, realización de la soldadura y criterios de aceptación.
2. Fabricación de las probetas significativas para realizar la prueba de soldadura.
3. Soldar las probetas de calificación.
4. Evaluación de la soldadura utilizando el formato WPQR, siguiendo los requerimientos de preparación de las muestras y los criterios de aceptación. El formato de WPQR se muestra en el ANEXO E.
5. En el caso de que la prueba sea satisfactoria, se realiza un WPS definitivo con los parámetros utilizados en la prueba. El proceso estará entonces homologado.

Cuando la prueba no es aceptada se determina las discrepancias que originaron esta condición y se modifica el pWPS. El flujograma de este proceso se muestra en la Figura 23.



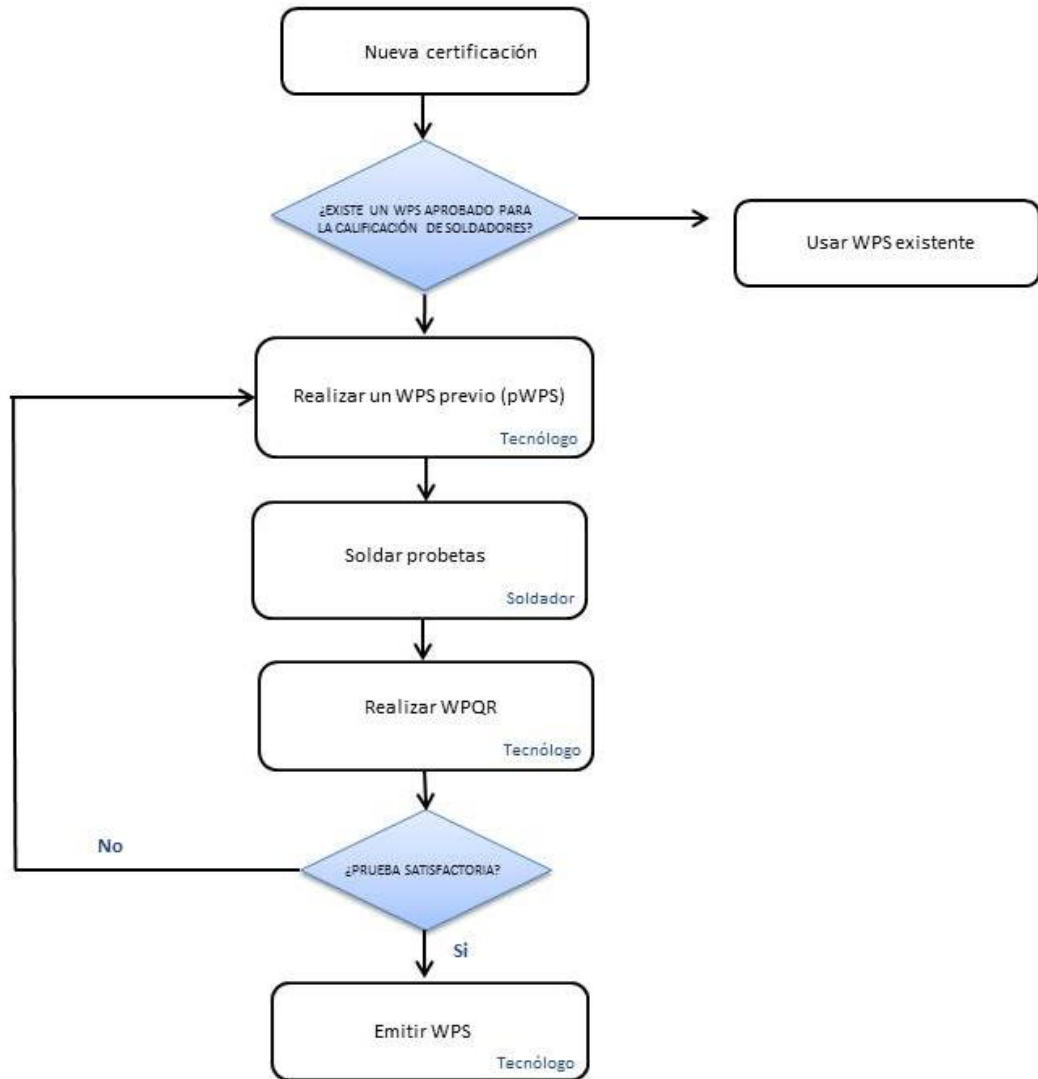


Figura 23: Flujograma para la emisión de un WPS.

#### 4.1.2.2. Calificación u homologación de soldadores

El flujograma de operaciones para calificar u homologar a un soldador se muestra en la Figura 24.

El CWI (Certified Welding Inspector) debe estar presente en todo momento del proceso de soldadura con el fin de verificar que todos los requerimientos dados en el WPS sean llevados a cabo adecuadamente.

El CWI es una persona autorizada por la AWS para realizar inspecciones y verificar que los trabajos de soldadura y la documentación se mantienen conforme a los requerimientos de las normas que se apliquen en cada proyecto. El CWI puede certificar la cualificación de los soldadores según los varios códigos y especificaciones de la AWS.

La evaluación de la soldadura es realizada por el CWI utilizando el formato WPQR,

siguiendo los requerimientos de preparación de las muestras y los criterios de aceptación dados en la AWS D17.

En el caso de que la prueba sea satisfactoria el CWI emite un WPQR definitivo con los parámetros utilizados en la prueba y los resultados de los ensayos. Así mismo emitirá un WPQ al soldador con las variables de la prueba de calificación y el rango de calificación. En la ANEXO F se muestra el WPQ utilizado en este proyecto.

Cuando la prueba no es satisfactoria, el CWI determina las discrepancias que originaron esta condición y en caso de ser requerido el WPS será modificado.

El código AWS D17.1 establece unos requerimientos físicos a los soldadores para poder ser calificados. Los soldadores deberán tener una agudeza visual de 20/30 o mejor en cada ojo, y serán capaces de leer la tabla de Jaeger No2 a 400mm. Se pueden usar gafas para conseguir los requisitos de la prueba visual.

#### **4.1.2.2.1 Tiempo de validez de la calificación**

Después de la primera calificación y la emisión del WPQ, éste es válido por un periodo de 2 años a partir de su fecha de emisión.

La calificación puede ser extendida por un periodo indefinido siempre y cuando se mantengan registros auditables, desde la fecha inicial de calificación, que verifique que un soldador u operador de soldadura no ha dejado soldar durante un periodo de 6 meses.

El personal homologado dispondrá de un sello personal e intransferible con el que identificará todas las soldaduras que realice.





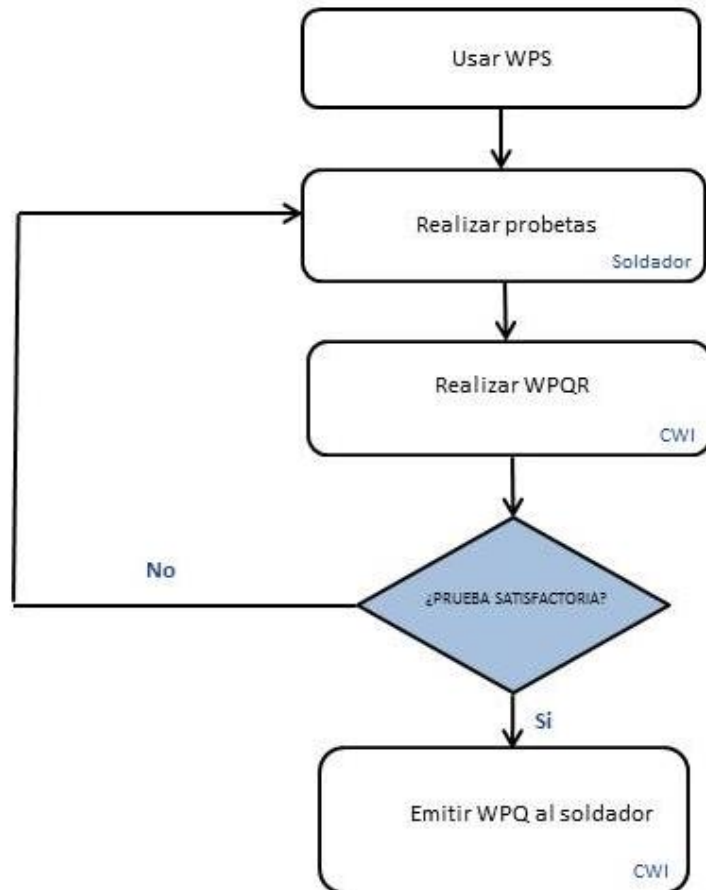


Figura 24: Flujograma de los pasos a seguir para calificar a un soldador

### 4.1.3. Proceso de Soldadura

#### 4.1.3.1. Materiales a soldar para la prueba de calificación.

En la Tabla 11 se muestran los grupos principales de materiales según la AWS D17.1. y una muestra de algunos de los materiales pertenecientes a cada grupo.

Una soldadura de ensayo realizada en un metal base incluido en uno de los grupos certifica únicamente ese grupo de materiales. No obstante, realizar la calificación en un grupo de metal base con letra “b” también certifica metales base con el mismo número romano y letra “a”. Los materiales agrupados en el Grupo VIII necesitan una calificación por separado de cada material.

Grupo	Materiales	Ejemplos de materiales
IA	Aceros al carbono	Aceros al carbono forjados: A36, A53, A106, A131... Aceros al Carbono de colada: A216, A352, A389, A487. Aceros de baja aleación de colada: A217, A389... Aceros de baja aleación tratable térmicamente: A514, <b>A633</b> ...
IB	Aceros al carbono térmicamente tratables	<b>4130</b> , 4135, 4140, 4340, 8630, D6AC...
IIA	Aceros inoxidable	Austeníticos: 201, 202, 301, 302, 303, 316, 321, 347... Ferríticos: 405, 406, 429, 430, 434, 436, 441, 442... Martensíticos: 403, 410, 414, 416, 420, 442, 431...
IIB	Aceros inoxidables endurecibles por precipitación	AM-350, AM-355, A-286, 17-4PH, <b>17-7PH</b> ...
IIIA	Aleaciones base níquel	Nickel 200 y 201 Monel®400 Hastelloy® B, B2, C, C4, G, G2, N, X, 276. Inconel® 620, <b>625</b> , 800, 800H, 825 Haynes® 20 Mod.
IIIB	Aleaciones base níquel endurecibles por precipitación	Monel®K500. Inconel® 601, 706, <b>718</b> , X750, 901, 903, 907, 909. Rene®41, 77, 80 Udinet®700
IV	Aleaciones de aluminio	No tratables térmicamente: 1060, 1100, 3003, 3004, <b>5086</b> ... Tratables térmicamente: 355, 356, 357, 2014, <b>6061</b> , 6063...
V	Aleaciones de magnesio	AM100A, <b>AZ31B</b> , AZ61A, EZ33A, HM21A, HK31A, QE22A...
VI	Aleaciones de titanio	<b>Ti-6Al-4V</b> , Ti-8Al-1Mo-1V, Ti-6Al-5Zr-0,5Mo-0.25Si, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo...
VII	Aleaciones base cobalto	Stellite® 6, 21, 23, 27, 30, 31. <b>HS188</b> ® L605 S816
VIII	Otras aleaciones diferentes de los grupos I-VII	Aleaciones refractarias (Cb, Mo, W) Aleación reactiva (Zr) Aleaciones base cobre

**Tabla 11: Grupos de metales base según la AWS D17.1. En negrita se muestra el material recomendado para la calificación del grupo.**

#### 4.1.3.2. Materiales de aporte

En el proceso de soldadura TIG manual se suelen utilizar varillas rectas en condiciones rígidas o semirrígidas para dar facilidad de manipulación al operador durante la alimentación de la varilla en el arco.

Las varillas de un mismo lote estarán identificadas individualmente por medio de una etiqueta adhesiva en forma de bandera. Es indispensable que las varillas estén en condiciones limpias y óptimas para soldar.

#### 4.1.3.3. Equipos de soldadura

El equipo de soldadura manual utilizado es un Miller Syncrowave 350LX con control de la intensidad de la antorcha mediante un pedal. El rango de amperaje del equipo es de 3-400 A y el voltaje máximo en circuito abierto de 80 V.

#### 4.1.3.4. Equipos de Protección Individual (EPI)

Los equipos de protección individual (EPI) de los soldadores se enumeran en el ANEXO G.



#### 4.1.3.5. Limpieza previa de las probetas.

Las superficies de las probetas deben estar limpias tanto mecánicamente como químicamente. En cualquier proceso de soldadura la presencia de grasas, aceites, óxidos, huellas digitales, etc., son fuente de contaminación del baño fundido, lo que interfiere negativamente en la calidad final del cordón que se obtenga.

No se permite el uso de disolventes halogenados ni metanol en la limpieza de aleaciones de titanio. La manipulación de piezas de titanio se llevará a cabo con guantes de algodón. Este requisito es recomendable para el resto de materiales.

Después de limpiar las probetas, las zonas a soldar serán mantenidas en condiciones limpias y protegidas de posible contaminación hasta el proceso de soldadura.

Inmediatamente antes de soldar las probetas pueden ser limpiadas con un cepillo de acero inoxidable. Los cepillos no deberán mezclarse para distintos grupos de materiales.

#### 4.1.3.6. Utilaje de respaldo

Durante las pruebas de calificación se utilizó un utilaje que sujeta las chapas para evitar que se deformen y permite que la raíz del cordón de soldadura este protegida con gas de respaldo. El utilaje se fabricó en acero y cobre.

#### 4.1.3.7. Gases de protección

Como gas de protección se utilizó argón puro. La composición química del argón utilizado cumple los requisitos de la normativa MIL-A-18455, tal y como indica el código AWS D17.1 (Tabla 12).

Composición	% en volumen Normativa		% en volumen Suministrador	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
O2	--	0.005	--	0.005
H2	--	0.005	--	0.005
N2	--	0.005	--	0.005
Ar	99.985	---	99.985	---

Tabla 12: Composición química del argón.

#### 4.1.3.8. Proceso inspección de soldaduras

Los requisitos para la inspección y criterios de aceptación de cada soldadura están recogidos en el código AWS D17.1.

Los ensayos no destructivos requeridos en las probetas para calificar a los soldadores, y que se deben incluir en el PQR, se resumen en la Tabla 13 y Tabla 14.

Tipo de soldadura	VT	PT	MT	RT	UT
A tope	si	si	a	a	N/A
En ángulo	si	si	a	a	N/A

**Tabla 13: Inspección visual y END requeridos en las probetas de calificación de soldadores. (a) Si lo exige el cliente**

Tipo de soldadura	Metalografía	Ensayo doblado	Ensayo tracción
A tope	a	b	a
En ángulo	si	b	a

**Tabla 14: Ensayos destructivos requeridos en las probetas de calificación de soldadores. (a) Si lo exige el cliente. (b) El examen metalográfico puede ser usado como alternativa al ensayo de doblado.**

Durante las inspecciones es importante diferenciar entre discontinuidad y defecto, ya que son términos que se suelen confundir.

**Discontinuidad** - Falta de continuidad o de cohesión. Interrupción en la estructura física del material.

**Defecto** - Discontinuidad cuyo tamaño, forma, orientación, ubicación o propiedades son no admisibles por el código o norma específica.

#### 4.1.3.8.1 Inspección visual

La inspección visual se trata de un método no destructivo mediante el cual una soldadura se debe ser inspeccionada antes, durante y después del proceso de soldadura. Durante las distintas fases de la inspección pueden detectarse discrepancias sobre los requisitos dispuestos en el código.

Las posibilidades de detección de esta técnica se limitan a aquellos defectos que son visibles al ojo humano, tales como grietas, poros, desgastes, cavitación, decoloraciones o corrosión. El Inspector de Soldadura (CWI) es el responsable de esta inspección.

(a) Inspección antes de la soldadura de las probetas.

- Comprobación de los certificados de los materiales base y de aporte cotejando que cumplen lo indicado por el código.
- Inspección de las superficies para detectar posibles defectos como incrustaciones, óxidos, grietas, laminaciones, cortes defectuosos o cualquier otra discontinuidad que pudiera afectar al cordón de soldadura.
- Revisión del estado de los materiales de aporte y de su correcto almacenamiento.

(b) Inspección durante el proceso de soldadura de las probetas.

- Aplicación correcta del procedimiento homologado según WPS.



- Uso correcto de los parámetros de soldadura del WPS.
- Uso correcto de materiales de aporte, gases de protección, temperaturas de precalentamiento y entre pasadas.
- Comprobar secuencia de la soldadura y las deformaciones que se produzcan.

(c) Inspección después del proceso de soldadura

- Inspeccionar la unión para encontrar posibles imperfecciones: mordeduras, grietas, salpicaduras, cráteres en los extremos, decoloración, etc. En el ANEXO H se definen las discontinuidades que se pueden encontrar en un material soldado.
- Con la ayuda de galgas y otras herramientas de medida se verificarán las dimensiones del cordón, su convexidad o concavidad y sobreespesor. Posteriormente estas medidas se cotejarán con los requisitos de calidad del código AWS D17.1.

#### 4.1.3.8.2 Ensayos no destructivos (END)

Los ensayos no destructivos son una herramienta esencial para el control de materiales y de procesos en la industria aeronáutica. Estos ensayos están basados en utilizar las propiedades físicas o químicas de los materiales para evaluar indirectamente las piezas sin dañar su funcionalidad.

Existen varios ensayos no destructivos para evaluar los metales base como así también los cordones de soldadura. Estos métodos de ensayo comparten algunos elementos en común como los que se enumeran a continuación:

- a) Una fuente de energía o medio de prueba.
- b) Una discontinuidad que provoca un cambio o alteración de la energía de prueba.
- c) Una guía o patrón para detectar este cambio.
- d) Una guía o patrón que indique este cambio.
- e) Una guía o patrón de observación o registro de esta indicación de manera que pueda interpretarse.

Los END se pueden clasificar según la ubicación de las discontinuidades que pueden ser detectadas.

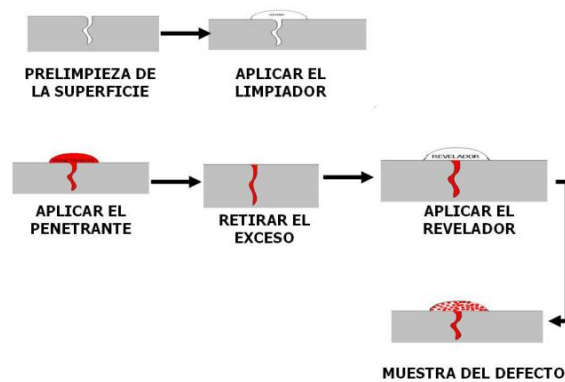
- END superficiales (Líquidos Penetrantes (PT) o Partículas Magnéticas (MT))
- END volumétricos (Rayos X (RT) o ultrasonidos (UT)).

Para la calificación de los soldadores se realizaron inspecciones por líquidos penetrantes (PT) e inspecciones radiográficas (RT) a las probetas.

### 4.1.3.8.3 Inspección por líquidos penetrantes (PT)

La inspección por líquidos penetrantes (PT) es un tipo de ensayo no destructivo que se utiliza para detectar e identificar discontinuidades presentes en la superficie de los materiales examinados. Generalmente se emplea en aleaciones no ferrosas, aunque también se puede utilizar para la inspección de materiales ferrosos cuando la inspección por partículas magnéticas es difícil de aplicar.

El procedimiento consiste en aplicar un líquido coloreado o fluorescente sobre la superficie de ensayo. Este líquido penetra en cualquier discontinuidad por capilaridad. Después de un determinado tiempo se elimina el exceso de líquido y se aplica un revelador, el cual absorbe el líquido que ha penetrado en las discontinuidades y sobre la capa del revelador se delinea el contorno de éstas (Figura 25).



**Figura 25: Secuencia del proceso de aplicación de líquidos penetrantes para detectar discontinuidades.**

Los ensayos por líquidos penetrantes pueden clasificarse según el líquido penetrante:

- 1) Color del penetrante.
  - a) Penetrantes coloreados: Se inspeccionan a simple vista. Solamente hay que contar con una fuente de luz blanca. Tienen menos sensibilidad (Figura 26).



**Figura 26: Grieta detectada en un cordón de soldadura mediante penetrantes coloreados.**

- b) Penetrantes fluorescentes: Se inspeccionan con la ayuda de una lámpara de luz



ultravioleta (luz negra). Sin luz negra las indicaciones son invisibles al ojo humano. Tienen mayor sensibilidad por lo que es la técnica utilizada en organizaciones de mantenimiento MRO.

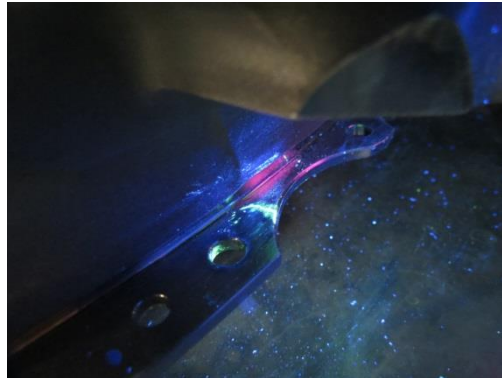


Figura 27: Ejemplo de grieta detectada en un componente con penetrante fluorescente.

## 2) Solubilidad del penetrante

- a) Penetrantes lavables con agua o autoemulsificables: Para su limpieza y remoción de excesos simplemente se usa agua. Resultan muy económicos de utilizar.
- b) Penetrantes postemulsificables: No son solubles en agua. Para la remoción de los excesos superficiales se utiliza un emulsificador que crea una capa superficial que se remueve con agua. Es el método con el que mayor sensibilidad se obtiene y en el que mayor dominio de cada una de las etapas tiene el operador.

Existen dos tipos de emulsificadores:

- i. Hidrofílicos: Son de base acuosa. Se utilizan en solución de agua en una saturación determinada.
  - ii. Lipofílicos: Son de base aceite. Se utilizan tal como los entrega el fabricante, no hace falta preparación previa.
- b) Penetrantes eliminables con disolvente: No son solubles en agua. Para su remoción se utiliza un disolvente no acuoso, denominado «eliminador». Son muy prácticos de utilizar ya que el solvente generalmente se presenta en aerosol.

### 4.1.3.8.4 Inspección radiográfica (RT)

La inspección radiográfica es un método que se basa en las propiedades que poseen los materiales de atenuar o absorber parte de la energía cuando son expuestos a una determinada radiación ionizante de alta energía. La energía es atenuada debido a

diferencias de espesores, densidad o presencia de discontinuidades. Las variaciones de atenuación o absorción son detectadas y registradas en una película radiográfica obteniéndose una imagen de la estructura interna de una pieza o componente.

La atenuación de la radiación ionizante es:

- Directamente proporcional al espesor y densidad del material.
- Inversamente proporcional a la energía del haz de radiación.

Las diferencias de atenuación producen diferencias en la ionización de la película radiográfica y esto provocará cambios de densidad radiográfica (grado de ennegrecimiento) en la película revelada.

Un área oscura en una radiografía, puede deberse a un menor espesor o a la presencia de un material de menor densidad, una grieta o una cavidad por gas. Un área más clara en una radiografía, puede deberse a secciones de mayor espesor o un material de mayor densidad como una inclusión de tungsteno en una soldadura GTAW.

La inspección por rayos X es muy útil para la detección, interpretación y evaluación de discontinuidades internas en soldaduras como son grietas, porosidades, inclusiones metálicas o no metálicas, faltas de fusión, etc.

Ventajas:

- Puede usarse en materiales metálicos y no metálicos.
- Proporciona un registro permanente de la condición interna de un material.
- La discontinuidad que se detecta es fácilmente identificable.
- Revela discontinuidades estructurales y errores de ensamble.

Limitaciones:

- Difícil de aplicar en piezas de geometría compleja o zonas poco accesibles.
- La pieza o zona debe tener acceso en dos lados opuestos.
- No detecta discontinuidades de tipo laminar.
- Se requieren medidas de seguridad para la protección contra la radiación.

Para verificar la resolución de la sensibilidad del ensayo se utilizan Indicadores de Calidad de Imagen (ICI (IQI)), o penetrámetros ('pennys'). Estos ICI (IQI) normalmente son de tipo 'cuñas' o 'alambre'. Los de tipo cuña tendrán espesor especificado e incluyen agujeros de distinto tamaño, mientras que los alambres tendrán diámetros especificados. La sensibilidad se verifica por la habilidad de detectar una diferencia dada en densidad debido al espesor del ICI (IQI) o el diámetro del agujero, o el diámetro del alambre.





#### 4.1.3.8.5 Examen Metalográfico

Según el código AWS D17.1., se requiere un examen metalográfico en todas las soldaduras en ángulo con un espesor de metal base de 1.6 mm o menor y podrá emplearse como alternativa a la prueba de plegado para soldaduras en ángulo con espesor de metal base de más de 1.6 mm.

A pesar de no ser obligatorio para soldaduras en chapa a tope, se realizaron ensayos metalográficos en las probetas de calificación para asegurar la calidad de las uniones soldadas.

## 4.2. Resultados

### 4.2.1. Materiales base y varillas utilizadas.

Los materiales utilizados para la calificación de soldadores por TIG manual se resumen en la Tabla 15.

Los soldadores no se calificaron en aceros al carbono ya que no hay piezas en los motores fabricadas con dichos materiales. Tampoco se calificaron en aceros inoxidable endurecidos por precipitación, ni en materiales del grupo VIII ya que no se detectó la necesidad.

Grupo		Material base		Material de aporte	
IA	Aceros al carbono	N/A	N/A	N/A	N/A
IB	aceros al carbono térmicamente tratables	N/A	N/A	N/A	N/A
IIA	Aceros inoxidable	AMS5560	AISI 304	AMS5680	AISI347
IIB	Aceros inoxidables endurecibles por precipitación	N/A	N/A	N/A	N/A
IIIA	Aleaciones base níquel	N/A	N/A	N/A	N/A
IIIB	Aleaciones base níquel endurecibles por precipitación	AMS5596	INCO718	AMS 5832	INCO718
IV	Aleaciones de aluminio	AMS4031	Alloy2219	AMS4191	Alloy2319
V	Aleaciones de magnesio	AMS4418	QE22AT6	AMS 4396	EZ33A
VI	Aleaciones de titanio	AMS4907	Ti6Al4V	AMS4956D	Ti6Al4V
VII	Aleaciones base cobalto	AMS5801	HS 188	AMS 5801E	HS188
VIII	Otras aleaciones diferentes de los grupos I-VII	N/A	N/A	N/A	N/A

**Tabla 15: Materiales base y de aporte utilizados para la calificación de soldadores por TIG manual.**

La nomenclatura AMS corresponde a la Aerospace Material Specifications de la SAE. SAE International es una asociación de expertos en la industria aeroespacial, automoción y vehículos comerciales.

La mayoría de los fabricantes de motor utilizan las especificaciones AMS para asegurar la calidad de los materiales utilizados. Las especificaciones AMS incluyen composición

química, requisitos técnicos detallados, propiedades mecánicas, referencias cruzadas a materiales similares, resistencia a la corrosión, etc. de cualquier material que se pueda utilizar en la industria aeroespacial.

#### **4.2.2. Calificación soldadores en el Grupo IIIb (aleaciones base níquel)**

En este apartado se van a mostrar con más detalle la soldadura realizadas en las probetas de calificación del grupo IIIb.

##### **4.2.2.1. Inspección antes de la calificación.**

###### **4.2.2.1.1 WPS**

Se realizaron varios WPS provisionales (pWPS) para determinar las condiciones óptimas para soldar las chapas de Inconel 718 y se realizó el WPS final de la calificación. El WPS utilizado para calificar los soldadores en el grupo III se muestra en la Figura 28.



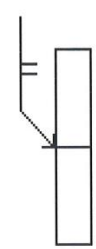

ESPECIFICACION DE PROCESO ESPECIAL (DATA CARD) WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)		SOLDADURA POR FUSION FUSION WELDING		NÚMERO: MISC-SOLD-III Number: MISC-SOLD-III		EDICION: 1 ISSUE: 1		HOJA: 1 DE: 1 SHEET: 1 OF 1	
<b>JUNTA JOINT</b>									
Nº QR SUPPORTING QR No.	PQR-CAL-INCONEL-718	MAQUINA MACHINE	MILLER Syncrowave 351	ESPEC. MATERIAL BASE 1	AMS5596 INCO718	FORMATO MAT BASE BASE METAL FORM	CAJAPA / SHEET		
PROCESO (GTAW, PAW, ...) WELDING PROCESS (GTAW, PAW, ...)	GTAW	ANTORCHA TORCH	Convencional	MATERIAL THICKNESS 1 (mm)	1,2	TIPO DE SOLDADURA TYPE OF WELD	A TOPE / GROOVE EN ANGLULO / FILLET		
TIPO (Manual, Semiautomática, ...) TYPE (Manual, Semiautomatic, ...)	Manual	MATERIAL ELECTRODO ELECTRODE MATERIAL	EWP	ESPEC. MATERIAL BASE 2	AMS5596 INCO718	Esquema / Joint details 			
ESPECIFICACION SOLDADURA WELDING SPECIFICATION	AWS D17.1	ELECTRODO Ø / ANGLULO ELECTRODE Ø / ANGLE	1,6 mm	MATERIAL THICKNESS 2 (mm)	1,2				
ESPECIFICACION INSPECCION INSPECTION SPECIFICATION	AWS D17.1	BOQUILLA Ø NOZZLE Ø	11 mm	DISEÑO JUNTA JOINT DESIGN	Chapa a tope Groove butt joint				
CRITERIOS DE ACEPTACION ACCEPTANCE STANDARD	AWS D17.1	DEFUSOR DE GAS GAS LENS	No	PASADA SIMPLE O MULTIPLE MULTIPLE OR SINGLE PASS	Simple Single				
LIMPIEZA PREVIA PREVIOUS CLEANING	Accione Action	UTILIAJE TOOLING	Utililaje probeta Coupon test tooling	MATERIAL DE APORTE Ø (mm) FILLER WIRE SPEC. Ø (mm)	AMS 5832 INCO718, 0,8mm				
<b>PARAMETROS DE SOLDADURA WELDING PROCEDURE</b>									
TIPO - CORRIENTE Y POLARIDAD CURRENT TYPE AND POLARITY	CC	ALTA FRECUENCIA (ON/OFF) HIGH FREQUENCY (ON/OFF)	N/A	<b>GASES GAS</b>					
CORRIENTE SOLDADURA (A) WELD CURRENT (A)	30-40	INTENSIDAD PULSACIONES (%) PULSATION INTENSITY (%)	N/A	TIPO GAS PROTECTOR GAS TYPE	Argon				
VOLTAJE (V) VOLTS (V)	8,5-9,5	TIEMPO ALTA PULSACION (ms) HIGH PULSE TIME (ms)	N/A	CAUDAL GAS ANTORCHA (l/min) TORCH GAS FLOW (l/min)	15				
INTENSIDAD PUNTEADO (A) TACK WELD INTENSITY (A)	N/A	TIEMPO BAJA PULSACION (ms) LOW PULSE TIME (ms)	N/A	CAUDAL GAS DE RESPALDO (l/min) BACKING GAS FLOW (l/min)	03-mny				
DISTANCIA ENTRE PUNTOS (mm) DISTANCE BETWEEN TACKS (mm)	N/A	TRAT. TÉRMICO PREVI PREHEAT REQUIREMENTS	N/A	CAUDAL GAS PROTECCION (l/min) TRAILING GAS FLOW (l/min)	N/A				
VELOCIDAD APORTE WIRE FEED SPEED	N/A	POSTFIELD HEAT REQUIREMENTS	N/A	PREFLUJO DE GAS (6) PREWELD GAS FLOW (6)	9				
AUTOR/AUTHOR:			MODIFICACIONES: CHANGES:						
 Mireia Gaona Latorre CWI 14031491 QC1 EXP. 3/1/2017			Penetración: 10 Chapa en estado recoecido.						
			FECHA DATE 07/01/2010						

Figura 28: WPS utilizado para calificar a los soldadores en el Grupo III (aleaciones base Níquel).

**4.2.2.1.2 Material base de las probetas y aporte.**

Antes de empezar con el proceso de soldadura se certificó que los materiales utilizados son los indicados en el WPS. Los certificados del material base con el que se han fabricado las probetas de Inconel 718 y el certificado de las varillas a utilizar se muestran en la Figura 29 y Figura 30.

ORIGINAL

Haynes International  
1020 West Park Avenue  
PO Box 9013  
Kokomo, Indiana, 46902

CERTIFICATION OF TESTS • RAPPORT D'ESSAIS CERTIFIÉ • WERKSZEUGNIS																			
Invoice No. No. De Facture Rechnungs-Nr. 380876001-0	Date Entered Date De Commande Bestelldatum 03/15/03	Customer Reference Référence Client Bestellungsnummer 4030826-001	Report No. Rapport No. Draufschrift 20030929062	Page of Pages Page de Page Anzahl der Seiten 1 OF 4	<b>HAYNES</b> International														
Sold To • Client • Beneficiario HAYNES INTL LTD PARKHOUSE ST OPENSHAW MANCHESTER M11 2ER GB			Ship To • Destinataire • Beneficiario HAYNES INTL LTD PARKHOUSE ST OPENSHAW MANCHESTER M11 2ER GB			Product Description • Description Produit • Material Beschreibung 0.045/0.05 x 39.37 x 78.74 HAYNES(R) 718 ALLOY SHEET NADCAP CERTIFICATE NUMBER 0089 S400E,S1000E, EN 10204 3.1.B													
Specification • Spécification • Spezifikation <b>AMS 5596 B718 INCONEL 718 B718 CAA P</b>			Quantity Ordered Quantité Commandée Bestellmenge 11 PC		Quantity Shipped Quantité Expédiée Liefermenge 11 PC														
Chemical Analysis • Analyse Chimique • Chemische Analyse																			
Heat Number Numero de Laiton Charge	Al	B	C	CPTL CPTL%	Cu	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	P	S	Si	Ti	V	W		
2180 3 9934	0.53	0.003	0.050	5.18	0.29	18.21	0.04	BAL.	0.24	3.04	53.47	<0.005	0.002	0.13	1.04				
	Si	Ta	Zr	Bi	Se	La	CH2004	Pb	Mg	Y	Ag	Ni	Ca	Al-Ti	Ni-Co				
2180 3 9934	5.130	<0.050		<0.00003				<0.0005				<0.0002							

Certified By • Certifié Par • Bescheinigt Durch: Paul Guest  
Certification Supervisor/Technician

09/29/03

Paul O. Guest

This report is the property of Haynes International. It is to be used only for the purposes for which it was prepared and is not to be used for any other purpose. It is to be kept confidential and its use is restricted to the specific project for which it was prepared. It is to be destroyed when the project is completed. It is to be kept in a secure location and its use is restricted to the specific project for which it was prepared. It is to be destroyed when the project is completed.

**Figura 29: Certificado de la chapa AMS5596 (Inconel 718)**



S-1697A CERTIFIED REPORT OF TESTS • RAPPORT D'ESSAIS CERTIFIE • WERKSZEUGNIS										OK: JNHAL													
WIPYDZICZNY NO. DE FACTURE / RECHINUNG NR.	REG. NO.	SUP.	DATE EXTEND / DATE DE COMMANDE / BESTELLDATUM	CUSTOMER REFERENCE / REFERENCE CLIENT / KUNDENBESTELLENR.	REPORT NO. / RAPPORT NO. / BELEG NR.	PAGE OF PAGES / PAGE DE PAGES / ANZAHL DER SEITEN	HAYNES International																
264269-1-1-0	00		990809	9991651	990927965	1 2	Haynes International, Inc. 1020 West Park Avenue P.O. Box 2012 Piquette, Indiana 46362-0112																
SOLD TO • CLIENT • BESTELLERANSCHRIFT			SHIP TO • DESTINATAIRE • LIEFERANSCHRIFT			9912936																	
PARKHOUSE ST RANCHESTER M11 2ER UNITED KINGDOM							PRODUCT DESCRIPTION / DESCRIPTION PRODUIT / MATERIAL BEZELIENINGEN .048 FLAG TAG x 0118 END x 36 HAYNES(R) 718 ALLOY DRAWN W/ RE - CUT LENGTHS																
SPECIFICATION • SPECIFICATION • SPEZIFIKATION AMS 5632E			QUANTITY ORDERED / QUANTITE COMMANDEE / BESTELLMENGE 50 LB ( 23 KG)			QUANTITY SHIPPED / QUANTITE EXPEDIEE / LIEFERMENGE 51 LB ( 23 KG)																	
HEAT NUMBER / NUMERO DE COULEE / CHARGE NR.		HEAT CODE		CHEMICAL ANALYSIS • ANALYSE CHIMIQUE • CHEMISCHE ANALYSE																			
18089655		23.1		RG	Al	B	C	Si	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	P	S	Si	Ti	V	W	CD	
					54	004	04		20.1625	0.25	0.1	0.02	0.01	0.02	0.05	0.002	0.01	0.02					509
TENSILE TEST AT ROOM TEMPERATURE / ESSAI DE TRACTION A TEMP. AMBIANTE / ZUGVERSUCH BEI ZIMMERTEMP.			TENSILE TEST AT ELEVATED TEMPERATURE / ESSAI DE TRACTION A HVE. TEMP. / ZUGVERSUCH BEI HOCHTEMP.			TENSILE TEST AT WARM TEMPERATURE / ESSAI DE TRACTION A WARM. TEMP. / ZUGVERSUCH BEI WARMTEMP.			STRESS RUPTURE / ESSAI A CHARGE DE RUPTURE / ZEIG ANHANGVERSUCH														
TEMP.			TEMP.			TEMP.			TEMP.														
ANHEALED / WARMPS / HANGPS			ADDED / HANGPS / HANGPS			GRAN / GROSSEUR DE GRAIN / KORNGROSSE			This material conforms to all technical requirements of AMS 5632E														
CERTIFIED BY / CERTIFIE PAR / BESCHENGT DURCH																							
<i>R. Powell</i>																							
09-27-99																							

Figura 30: Certificado de las varillas de material de aporte AMS5832 (INCONEL 718)

#### 4.2.2.1.3 Preparación de las probetas en el útil.

Las probetas se colocaron en el útil de calificación tal y como indica la WPS. El útil evita la distorsión de las probetas durante la soldadura y permite proteger la raíz del cordón de soldadura con una purga de argón (Figura 31).

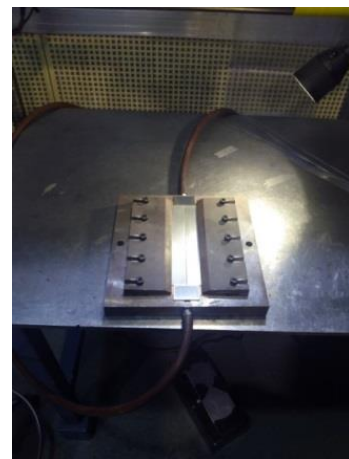
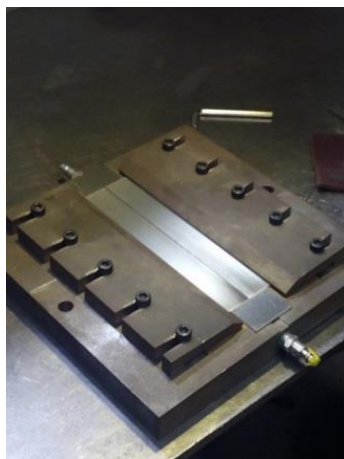


Figura 31: Colocación de las probetas de calificación en el útil.

#### 4.2.2.2. Inspección durante el proceso de soldadura

Durante el proceso de soldadura se comprobó la aplicación correcta del procedimiento homologado según WPS y que se respetaban las normas de seguridad básicas.

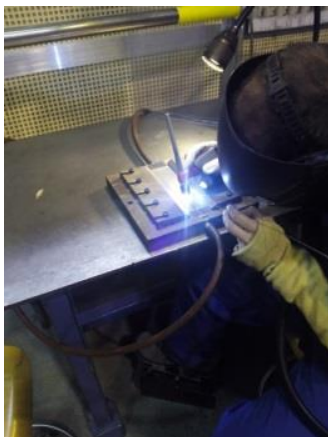


Figura 32: Soldador durante la prueba de calificación.

#### 4.2.2.3. Inspección tras el proceso de soldadura.

##### 4.2.2.3.1 Inspección Visual

La inspección visual tras la soldadura se requiere para todas las soldaduras de ensayo y se realiza con la soldadura en estado bruto. La inspección visual se centra en:

- Examinar el acabado de la soldadura, mediante reglas, galgas y escuadras para verificar que sus dimensiones son correctas.
- Detectar las posibles discontinuidades inaceptables según el código AWS D17.1 que puedan reducir la vida a la fatiga, tales como cráteres en los extremos de los cordones, grietas, falta de penetración, mordeduras y solapamientos.

En la Figura 33 se muestra la probeta de Inconel 718 soldadas para la calificación. Las probetas son aceptables tras la inspección visual.



Figura 33: Probeta soldada para la calificación del soldador en el grupo IIIb (material base INCONEL 718)



El CWI preparará un informe escrito en el que se incluya el número y la denominación del trabajo, fecha y resultados de la inspección, así como el nombre y firma del inspector que la ha efectuado. El informe de inspección visual de esta calificación se muestra en la Figura 34.

INSPECCIÓN VISUAL (VT) PARA CALIFICACION DE SOLDADORES Y OPERADORES DE SOLDADURA VISUAL INSPECTION (VT) FOR QUALIFICATION OF WELDERS AND WELDERS OPERATORS			
Número Informe / Report Number: CAL - GROUP IIIB			
PQR No./ PQR: PQR-CAL-GROUP III		Fecha / Date: 05/05/2014	
<input checked="" type="checkbox"/> Soldador / Welder <input type="checkbox"/> Operador de soldeo / Welding operator			
Nombre / Name: N/A		Número de ID / ID Number: N/A	
Materiales Base / Parents materials: AMS 5596 (INCONEL 718)		Grupo / Group: GROUP IIIB	
Material de aporte / Filler Material: AMS 5832 (INCONEL 718)		Especificación / Specification: AWS D17.1	
Discontinuidad / Discontinuity	Criterio de Aceptación / Acceptance Criteria	Resultado / Result	
		ACEPTADO/ Accepted	RECHAZADO/ Rejected
Grietas / Cracks	Ninguna / None	X	
Traslape/ Overlap	Ninguna / None	X	
Fusión Incompleta / Incomplete fusion	Ninguna / None	X	
Penetración Incompleta / Incomplete penetration	Ninguna / None	X	
Porosidad superficial / Surface Porosity	Tamaño individual máximo 0.25 T o 0.030" lo que sea menor / Individual size maximum 0.25T or 0.030" whichever is less	X	
	Espacio mínimo 8 veces el tamaño de la imperfección adyacente más grande / 8 times the size of the larger adjacent imperfection	X	
Socavado / Undercut	Profundidad máxima 0.002" / For the full length of weld maximum depth 0.002"	X	
	Defecto individual máximo 0.07 T o 0.030" lo que sea menor / Individual size maximum 0.07 T or 0.030" whichever is less	X	
Concavidad en cara o raiz (soldadura a tope) / Face or root underfill (groove welds)	En todo el cordón profundidad máxima 0.005" / For the full length of weld maximum depth 0.005"	X	
	Tamaño individual máximo 0.20 T o 0.030" lo que sea menor / Individual size maximum 0.25T or 0.030" whichever is less	X	
Craters / Craters	Tamaño individual máximo 0.25 T o 0.030" lo que sea menor / Maximum depth 0.20T or 0.030" whichever is less	X	
	Longitud máxima 1 T / Maximum length 1T	X	
Golpes de arco / Arc strikes	No aceptables / Unacceptable	X	
Desalineación / Mismatch between members after welding	Ver figura 7.2 / See figure 7.2	X	
Perfiles de soldadura / Weld profiles	Ver figura 7.1 / See figure 7.1	X	
Tamaño de la soldadura de filete / Fillet Weld Size	De acuerdo a plano de fabricación/ Fillet size as required on drawing	N/A	
	Tamaño mínimo cuando no es especificado en el plano: 1.5 T / Minimum size 1.5T when fillet weld size is not stated on te drawing	N/A	
Coloración Titanio / Discoloration Titanium	Plata brillante / Bright silver	Acceptable / Acceptable	N/A
	Plata / Silver	Acceptable / Acceptable	N/A
	Amarillo paja claro / Light Straw	Acceptable / Acceptable	N/A
	Amarillo paja oscuro / Dark Straw	Acceptable / Acceptable	N/A
	Bronce / Bronze	Acceptable / Acceptable	N/A
	Café / Brown	Acceptable / Acceptable	N/A
	Violeta / Violet	No acceptable / Reject	N/A
	Verde / Green	No acceptable / Reject	N/A
	Azul / Blue	No acceptable / Reject	N/A
	Gris / Gray	No acceptable / Reject	N/A
Coloración aleaciones de Acero inoxidable, Níquel y Cobalto / Discoloration Stainless Steel, Nickel and Cobalt Alloys	Todos los colores de oxidación excepto el negro / All oxidation colors, except for black	Acceptable / Acceptable	X
	Negro / Black	No acceptable / Reject	X
Coloración del acero / Discoloration Steel	Todos los colores de oxidación excepto el negro / All oxidation colors, except for black	Acceptable / Acceptable	N/A
	Negro / Black	No acceptable / Reject	N/A
Conclusiones / Conclusions: Soldadura a tope aceptable / Groove weld acceptable			
Observaciones / Remarks: N/A			
Realizado by / Inspected by: MIREIA GAONA CWI 14031491			



Mireia Gaona Latorre  
CWI 14031491  
QC1 EXP. 3/1/2017

Figura 34: Informe de inspección visual (VT)

#### 4.2.2.3.2 Inspección por líquidos penetrantes

La secuencia de pasos para proceder con la inspección por líquidos penetrantes sobre la probeta de calificación se muestra en las Figura 35, Figura 36, Figura 37 y Figura 38. Los pasos a seguir se resumen a continuación.

##### 1. Aplicación del penetrante

Aplicar el Penetrante mediante una brocha y dejarlo actuar 15min (tiempo de penetración) para que el Líquido Penetrante entre en las discontinuidades por capilaridad. Se ha utilizado como líquido penetrante Ardrox 970 P25 (Alta sensibilidad, Nivel 3)

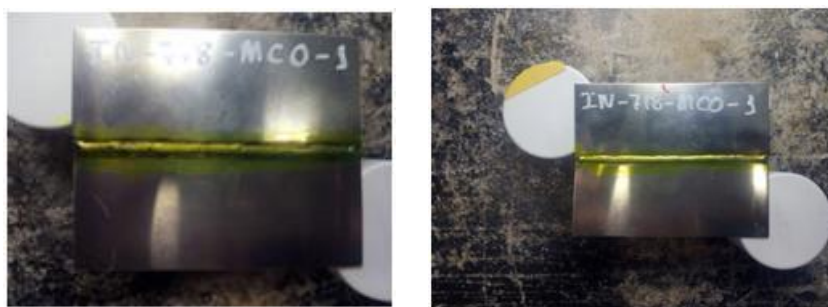


Figura 35: Aplicación del penetrante mediante brocha

##### 2. Eliminación del exceso de penetrante

Eliminar el penetrante sobrante de la superficie con ARDROX 9PR5. Eliminar el penetrante con un trapo ligeramente impregnado con eliminador.



Figura 36: Remoción del penetrante con un paño limpio mojado en eliminador.

##### 3. Aplicación del revelador :

Aplicar el Revelador (ARDROX 9D1B) en forma de spray. Aplicar tres o cuatro pasadas hasta obtener una capa blanca continua. Dejarlo actuar 15 minutos.







Figura 37: Aplicación del revelador en spray.

#### 4. Observación con luz ultravioleta

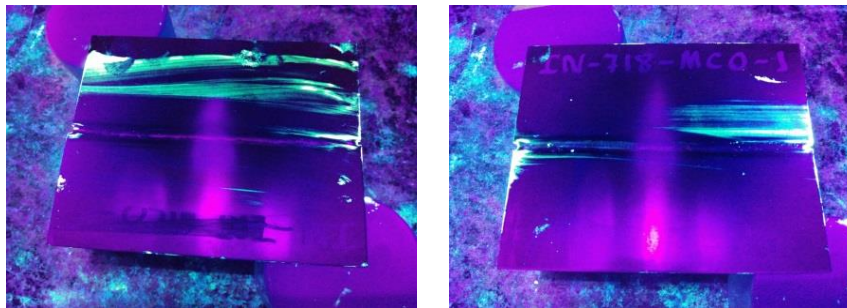


Figura 38: Observación bajo luz negra. No se observan defectos en el cordón de soldadura

El informe de líquidos penetrantes, realizado por un Nivel II y supervisado por un Nivel III, se muestra en la Figura 39. El informe valida que no se han encontrado defectos en la probeta de calificación.

INFORME DE ENSAYO POR LIQUIDOS PENETRANTES											
Cliente: Proyecto						Informe nº: CAL - INGENIERIA					
Dirección:						Fecha: 5-5-2014 <span style="float: right;">Página: nº 1</span>					
CONDICIONES DE ENSAYO						Referencia de trabajo:					
Limpieza previa: DESFOGADO						Pedido:					
Familia de penetrantes:						Plano:					
Marca de productos: ARDROX						Denominación: PIEDRA Nº SOLDADURA					
Ref. penetrante:						S/N: DN-218-					
Ref. emuls/elim.:						Material: [WCOVER 218]					
Ref. revelador:						Colada nº: N/A					
Temperatura de ensayo: 20 °C						T. penetración:					
Iluminación: Luz blanca: 500 Lx Luz negra: 1200 W/m²						T. secado:					
						T. Térmico: N/A					
						Estado superficial: Instrumentado					
						Extensión del ensayo: Superficie total.					
RESULTADOS DEL ENSAYO. INDICACIONES OBSERVADAS											
Indic. nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tipo indicación											
Longitud											
Anchura											
Aesp./Resid.											
CROQUIS SITUACION INDICACIONES											
Norma(s) ensayo: ASTM E 1417-05						Procedimiento: -					
Lugar de ensayo: N/A						Fecha de ensayo: 5-5-14			Operador: [Redacted] Nivel: II		
						Inspector cliente:			Supervisor de ensayo: [Redacted]		
						Fecha:			Nivel: III Fecha: 5-5-14		
						Firma:			Firma:		

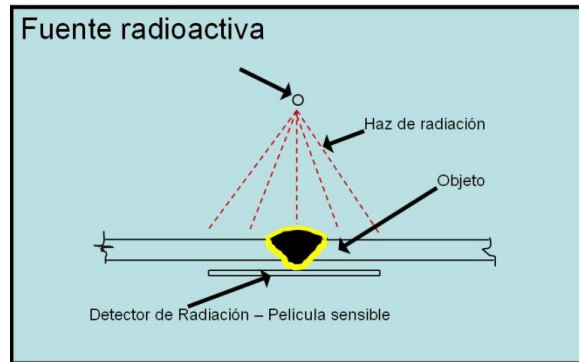
Figura 39: Informe de inspección por líquidos penetrantes.

#### 4.2.2.4. Inspección por Rayos X

La radiografía de las soldaduras permite obtener una imagen fotográfica producida al incidir rayos X o gamma sobre una placa sensible, después de haber atravesado una unión soldada. La finalidad de este ensayo es conseguir una imagen nítida y estable de los defectos que puedan existir dentro del cordón de soldadura (no superficiales).

En chapas soldadas, la película se coloca en la zona de la raíz del cordón y los indicadores de calidad de imagen (ICI) se colocarán, siempre que sea posible, del lado de la fuente (Figura 40). La inspección radiográfica debe realizarla operadores calificados Nivel II en esta técnica.

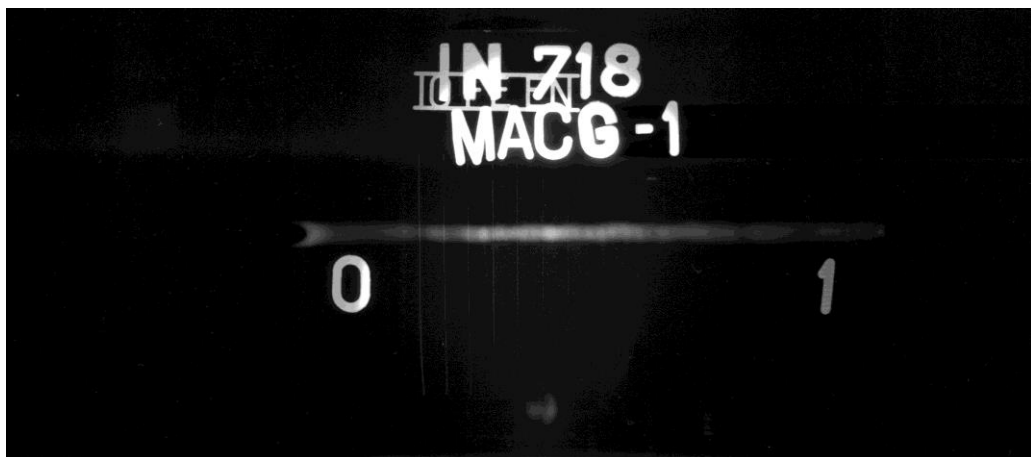




**Figura 40: Disposición de la probeta, la fuente de RX y la película.**

La película revelada de la probeta de calificación de Inconel 718 se muestra en la Figura 41. No se observan grietas, solapes, desalineamiento, poros o inclusiones de tungsteno.

El informe de inspección radiográfica (Figura 42) valida la ausencia de defectos.



**Figura 41: Radiografía de la probeta de calificación de soldadura Inconel 718**

INSPECCION RADIOGRAFICA I.R.X.		HOJA TECNICA I.R.X.Nº CAL - INCONEL 718	
		Edic.: I Rev.: 0 Hoja 1 de 1	
MOTOR: S/N O.T.		SUBCONJUNTO SUPERIOR: EXPEDIENTE NUMERO: NUM. DE OPERARIO SOLD:	
DENOMINACION PIEZA: PROBETA DE SOLDADURA		P/N S/N:	
TECNICA Y PARAMETROS EMPLEADOS			
MATERIAL PIEZA: INCONEL 718		ESPESOR RADIOGRAFICO 1,2 mm	
EQUIPO: 160 KV - PHILIPS		MODELO: M.C.N. 161	
KV.: 100	mA.: 55	TIEMPO EXPO.: 30 seg.	DISTANCIA FOCAL: 800 mm.
PELICULA: KODAK AX AGFA D7	REVELADOR: G150 FLJADOR: G 350	1º Revelado: 20°C	Tiempo revelado: 5 min.
PENETRIMETRO: DIN. G2FE/10 ISO 16		DENSIDAD RADIOGRAFICA: Requerida: Mínimo >1,8 Obtenida:	
NIVEL DE CALIDAD RADIOGRAFICA		AREA RADIOGRAFIADA: CORDON DE SOLDADURA	
INSPECCION LIMPIEZA: Aceptado: X Rechazado:		IDENTIFICACION FILM: ABAJO REFERIDOS.	
INTERPRETACION RADIOGRAFICA: * INCONEL → SIN DEFECTOS. * INCONEL → SIN DEFECTOS.			
RESULTADO FINAL: Aceptado: X Sello Inspector:		DOCUMENTACION APLICADA: AMI-STD-1595	
Rechazado: Fecha: 6-5-14			
Realizado: Nivel II		Aprobado: Nivel III	

Figura 42: Informe de inspección radiográfica.

### 4.2.2.5. Inspección metalográfica

#### 4.2.2.5.1 Microestructura Inconel 718

El Inconel 718 tiene una microestructura compleja que consiste en una matriz FCC austenítica (fase  $\gamma$ ), con fases intermetálicas coherentes  $\gamma'$  y  $\gamma''$  y carburos dispersos en la fase  $\gamma$ .

La gran resistencia a la fluencia a alta temperatura de estas aleaciones se debe a la precipitación de las fases  $\gamma'$  ( $Ni_3(Al, Ti)$ ) o  $\gamma''$  ( $Ni_3Nb$ ). La fase  $\gamma'$  está constituida principalmente por aluminio/titanio y níquel mediante la formación del compuesto  $Ni_3Al, Ti$  con una estructura metaestable de tipo cúbico simple. En algunos casos el níquel puede ser sustituido por cobalto. La fase  $\gamma''$  es una fase metaestable formada por  $Ni_3Nb$  con una estructura tetragonal centrada en el cuerpo. Ambas fases presentan una estequiometría  $Ni_3X$ , pero la estructura cristalina de la fase  $\gamma'$  contiene átomos de Ni y Al ordenados en la



celda unidad mientras que en la fase  $\gamma''$  éstos átomos están desordenados. La alta compatibilidad de estas fases con la matriz debido a su estructura cristalina y su constante de red permite la distribución homogénea de los precipitados con baja energía y una extraordinaria estabilidad superficial.

El control del tamaño de grano en estas superaleaciones es muy importante, ya que si los granos son demasiado pequeños tienden a disminuir la resistencia a la fractura, pero si son excesivamente grandes se pueden perjudicar las propiedades de tensión y resistencia a la fluencia.

La gran dureza que presentan el Inconel 718 se debe a que las dislocaciones se anclan en la interfase de los dos constituyentes (se pueden mover a través de la fase  $\gamma$ , pero se anclan cuando llegan a un intermetálico precipitado).

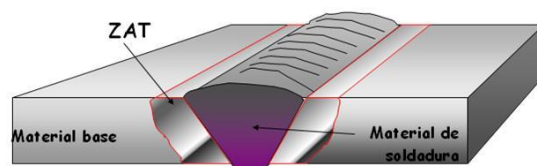
El tamaño final de los microcristales de fase  $\gamma'$  y  $\gamma''$  dependen de la velocidad de enfriamiento y puede llegar a ser el 60 % del volumen de la aleación. Cuando estas superaleaciones son muy duras, también son bastante frágiles. Una adición del 0.02 % de boro en estas superaleaciones mejora considerablemente la mecanización. La resistencia máxima se consigue a 850 °C, y la resistencia mecánica es útil hasta 1000 °C.

Los carburos por su parte, contribuyen eficazmente a aumentar la dureza de la matriz  $\gamma$ . En este tipo de superaleaciones, generalmente se encuentra presente el carbono en proporciones desde 0,05% hasta 2%. Los elementos presentes en la matriz ejercen una reacción con el carbono para la formación de distintos tipos de carburos que pueden clasificarse en carburos tipo MC, tipo  $M_6C$  y tipo  $M_{23}C_6$ , los cuales son los más comunes, especialmente a temperaturas cercanas a los 815°C donde estos son las principales fases de equilibrio. Los carburos MC son compuestos de estructura FCC, altamente estables y de alta resistencia, heterogéneamente distribuidos a través de la aleación en forma de precipitados alargados. Este tipo de carburos tiende a desaparecer por completo después de muchas horas de operación (> 5000 horas) degradándose para formar los carburos de tipo  $M_{23}C_6$ . Estos últimos se forman a partir de la degradación de los carburos MC al someter estos a temperaturas mayores a 800°C por periodos largos de tiempo. Este tipo de carburos normalmente precipita a lo largo de los límites de grano, como pequeñas partículas que van aumentando progresivamente de tamaño a medida que transcurre el tiempo de servicio. Los carburos  $M_6C$  precipitan en los bordes de grano cuando se alcanzan temperaturas que se encuentran entre 815°C y 980°C.

#### 4.2.2.5.2 Soldadura Inconel 718

El Inconel 718 puede ser soldado por la mayoría de los procesos convencionales. Se recomienda soldarlo en estado recocido o solubilizado, y no debe procederse con la soldadura si la dureza es muy alta.

Un cordón de soldadura obtenido por una pasada simple, como se ha hecho en la calificación, tiene tres partes bien diferenciadas (Figura 43).



**Figura 43: Partes del cordón de soldadura.**

- a) Zona del material de soldadura: Es la zona central, que está formada básicamente por el metal de aporte.
- b) Zona Afectada Térmicamente (ZAT o HAZ): Es la más próxima a la zona del cordón. Esta zona, aunque no ha sufrido fusión, sí ha soportado altas temperaturas con posibles consecuencias desfavorables y provocando tensiones internas.
- c) Metal base no afectado térmicamente: Metal base que no ha sufrido las altas temperaturas provocadas por el arco y mantiene su microestructura original.

En la Figura 44 se muestra la sección transversal del cordón de soldadura de la probeta de calificación de Inconel 718. Se observa claramente como el cordón de soldadura presenta una penetración total (el cordón es más ancho que el metal base) y se pueden diferenciar las tres zonas en las que se divide un material soldado con un cordón de soldadura.



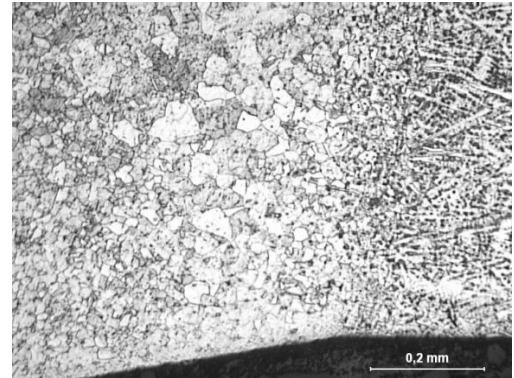
**Figura 44: Fotografía de la sección transversal de la probeta soldada e identificación de las diferentes zonas con las que cuenta un cordón de soldadura (zona de soldadura o fusión, zona afectada por la temperatura ZAT y el material base).**



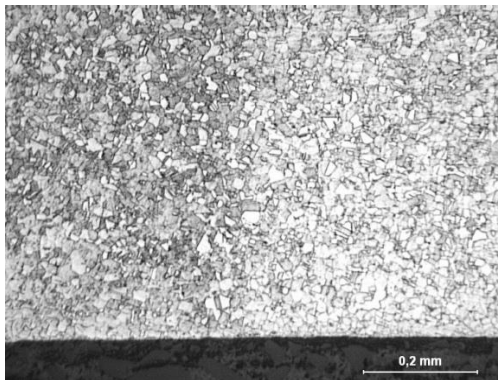
Como se observa en la Figura 45, el cordón de soldadura presenta una estructura dendrítica. Este tipo de estructura es característica de un enfriamiento rápido en soldaduras de superaleaciones. Cuando la sección del cordón de soldadura es pequeña respecto al volumen total de la pieza, existe un gradiente de temperatura entre el frente de solidificación y el fundido. Al enfriar la mezcla líquida, primero solidifica la fase  $\gamma$  austenítica (punto de fusión mayor) por lo que la fase líquida se enriquece de soluto, la cual solidifica a una temperatura menor y aparece la  $\gamma'$  segregada dentro de la matriz metálica.



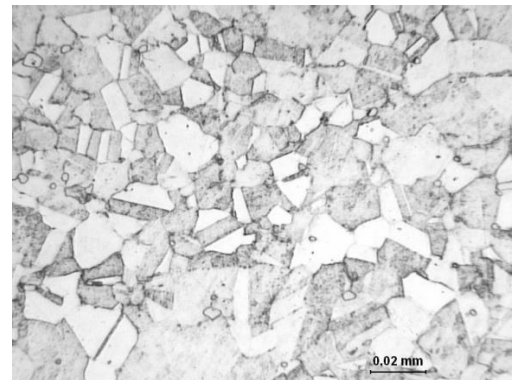
**Figura 45: Cordón de soldadura(x100). Zona 1-A de la Figura 44.**



**Figura 46. Zona de transición y afectada térmicamente (ZAT). Zona 2-A de la Figura 44.**



**Figura 47: Zona no afectada por el cordón de soldadura. Se observan granos equiaxiales pequeños. Zona 3-A de la Figura 44 (x100)**

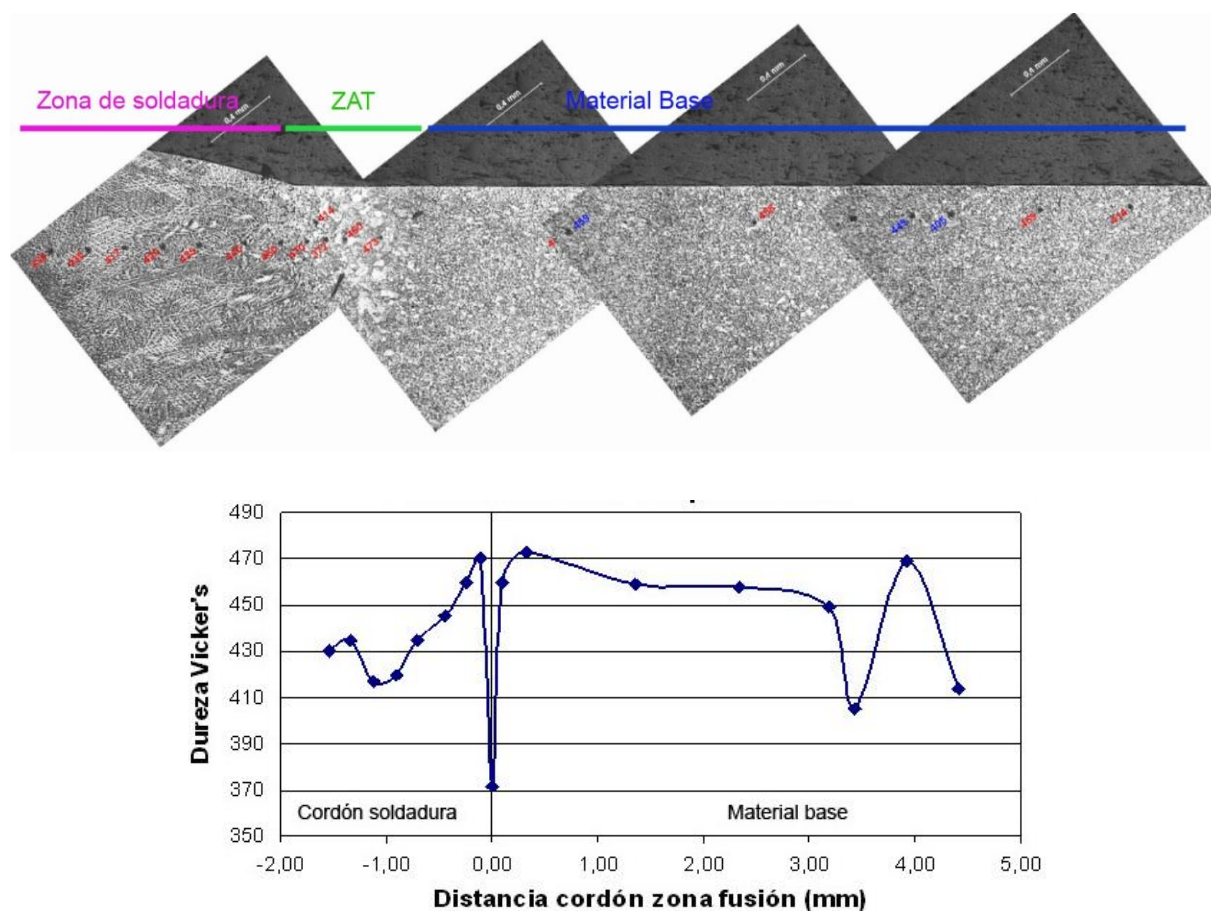


**Figura 48: Detalle de la Figura 47. Zona 4-A (x500)**

La zona afectada térmicamente, conocida en forma simplificada como ZAT (Figura 46), es una zona de gran importancia en la metalurgia del cordón de soldadura. El metal adyacente al cordón experimenta cambios de acuerdo al máximo de temperatura alcanzado y a la velocidad de enfriamiento experimentada. La temperatura máxima alcanzada en la zona

cercana a la línea de fusión es lo suficientemente alta para causar un crecimiento de grano, mientras que en la zona más alejada de la línea de fusión la temperatura alcanzada es insuficiente para causar cambios y se mantiene la estructura del metal base. En la zona más alejadas del cordón de soldadura no se observan cambio microestructurales causados por el aporte térmico del proceso de soldadura y el metal base mantiene su estructura original (Figura 47 y Figura 48).

Para evaluar las consecuencias del cambio estructural que sufre el material durante la soldadura se realizaron pruebas de microdureza Vickers desde el centro del cordón de soldadura hasta el material base. La variación de la dureza respecto al cordón de soldadura se muestra en la Figura 49.



**Figura 49: Evolución de la dureza para la probeta de homologación.**

La distancia 0 mm corresponde aproximadamente con el límite entre el cordón de soldadura y el material base. Los valores negativos de distancia corresponden a la zona del cordón de soldadura, mientras que los positivos corresponden a la zona material base. Se observa un





descenso brusco de la microdureza en la zona de unión a borde debido a las bajas propiedades mecánicas de esta zona.

No se detectan defectos en las metalografías por lo que el ensayo acepta la soldadura en su estado.

#### 4.2.2.6. WPQR

El WPQR que recoge los resultados de los ensayos realizados a la probeta y permite calificar al soldador en el grupo III se muestra en la Figura 50.

REGISTRO DE CUALIFICACIÓN DE PRODECIMIENTO SEGÚN CÓDIGO AWS D17.1:2001 PROCEDURE QUALIFICATION TEST RECORD IN ACCORDANCE WITH AWS D17.1:2001 CODE		
WPQR No: PQR - CAL- GROUP III <i>WPQR No.</i>	Soldador ✓ <i>Welder</i>	Operador de Soldeo <i>Welding Operator</i>
Nombre: XXXXXXXXXXXXX <i>Name</i>	N.I.F.: XXXXXXX <i>Id. No.</i>	No trabajador: XXX <i>Welder No.</i>
Especificación de Procedimiento de Soldadura (WPS) No: SOLD-GROUP III <i>Welding Procedure Specification (WPS):</i>	Rev.: 01	Fecha: 07-01-2010 <i>Rev. Date:</i>
Fecha de la Prueba de Cualificación: 05-05-2014 <i>Qualification Test Date</i>		



Ensayos Efectuados Test				
Identif. Cupón de prueba <i>(Test specimen I.D.No.)</i>	Tipo de Ensayo <i>(Type of Test)</i>	No de informe de ensayos <i>(Test report No.)</i>	Resultado del ensayo <i>(Test results)</i>	Observaciones <i>(Remarks)</i>
CAL-INCONEL 718	Visual (VT)	CAL- INCONEL 718	ACCEPTABLE	
	Líquidos Penetrantes (PT)	CAL-INCONEL 718	ACCEPTABLE	
	Rayos X (RT)	CAL-INCONEL 718	ACCEPTABLE	
	Ultrasonidos (UT)	N/A		
	Tensile test	N/A		
	Bend Test	N/A		
	Partículas magnéticas (MT)	N/A		

Mireia Gaona Latorre  
 AWS Certified Welding Inspector CWI N° 14031491



**Figura 50: WPQR realizado sobre la probeta de Inconel 718 para calificar al soldador**

#### 4.2.2.7. WPQ

El WPQ o la calificación del desempeño del soldador se muestra en la Figura 51. Este documento muestra el rango de calificación en la que el soldador puede soldar componentes aeroespaciales.



REGISTRO DE CUALIFICACIÓN DE SOLDADOR SEGÚN CÓDIGO AWS D17.1:2001 WELDER QUALIFICATION TEST RECORD IN ACCORDANCE WITH AWS D17.1:2001 CODE			
Informe No:XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX	Soldador <input checked="" type="checkbox"/>	Operador de Soldeo	
Report No.	Welder	Welding Operator	
Nombre: XXXXXXXXXXXXXXXX	N.I.F.: XXXXXX	No trabajador: XXXXX	
Name	Id. No.	Welder No.	
Especificación de Procedimiento de Soldadura (WPS) No: SOLD-GROUP III	Rev.: 01	Fecha: 07-01-2010	
Welding Procedure Specification (WPS):	Rev.	Date:	
Fecha de la Prueba de Cualificación: 05-05-2014			
Qualification Test Date			

	Variables de la Prueba de Cualificación <i>Actual values used in Qualification Test</i>				Rango de Cualificación <i>Qualification Range</i>					
Proceso de Soldeo <i>Welding Process (Table 4.1)</i>	GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)				GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)					
Metal Base / Especificación <i>Base metal / Specification (Table 4.2)</i>	INCONEL 718 Group IIIb				GROUP IIIa and IIIb – Nickel alloys					
Corriente / Polaridad <i>Current / Polarity (Table 4.4)</i>	Alterna AC				Alterna AC					
	CCEN DCEN		<input checked="" type="checkbox"/>		CCEN DCEN			<input checked="" type="checkbox"/>		
Progresión de la Soldadura <i>Weld Progresión</i>	CCEP DCEP				CCEP DCEP					
	No aplica N/A		<input checked="" type="checkbox"/>		No aplica N/A			<input checked="" type="checkbox"/>		
	Ascendente Up				Ascendente Up					
Soldeo Por un lado/Ambos lados <i>Single Weld / Double Weld</i>	Descendente Down				Descendente Down					
	Soldeo Por un lado Single Weld		<input checked="" type="checkbox"/>		Soldeo Por un lado Single Weld			<input checked="" type="checkbox"/>		
Respaldo <i>Backing</i>	Ambos Lados Double Weld				Ambos Lados Double Weld					
	Sí Yes				Sí Yes			<input checked="" type="checkbox"/>		
Penetración: <i>Penetration</i>	No No		<input checked="" type="checkbox"/>		No No			<input checked="" type="checkbox"/>		
	Parcial Partial				Parcial Partial			<input checked="" type="checkbox"/>		
Posición / Tipo unión y producto <i>Position /Join and product type</i>	Completa Full		<input checked="" type="checkbox"/>		Completa Full			<input checked="" type="checkbox"/>		
		1G	2G	3G	4G		1G	2G	3G	4G
	Chapa a tope: Sheet Groove	<input checked="" type="checkbox"/>				Chapa a tope Sheet Groove	<input checked="" type="checkbox"/>			
		1F	2F	3F	4F		1F	2F	3F	4F
	Chapa en ángulo: Sheet Fillet					Chapa en ángulo: Sheet Fillet	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
		1G	2G	3G	4G		1G	2G	3G	4G
Espesores / Diameters <i>Thickness / Diameters</i>	Tubo a tope: Tube Groove					Tubo a tope: Tube Groove	<input checked="" type="checkbox"/>			
		1F	2F	3F	4F		1F	2F	3F	4F
	Tubo en ángulo: Tube Fillet					Tubo en ángulo: Tube Fillet	<input checked="" type="checkbox"/>			
	<b>1.2 mm</b>				Espesor t (mm) <i>Thickness</i>		Diámetro (mm) <i>Diameter OD</i>			
	Chapa a tope / Sheet Groove				Min.	Máx.	Min.	Máx.		
	Chapa en ángulo / Sheet Fillet				0.8	4.8	--	--		
	Tubo a tope / Tube Groove				>1.6	4.8	--	--		
	Tubo en ángulo / Tube Fillet				0.8	4.8	25.4	Ilimitado/Unlimited		
					>1.6	4.8	25.4	Ilimitado/Unlimited		

Ensayos Efectuados Test				
Identif. Cupón de prueba <i>(Test specimen I.D.No.)</i>	Tipo de Ensayo <i>(Type of Test)</i>	No de informe de ensayos <i>(Test report No.)</i>	Resultado del ensayo <i>(Test results)</i>	Observaciones <i>(Remarks)</i>
CAL- INCONEL 718	Visual (VT)	CAL- INCONEL 718	ACEPTABLE	PQR – CAL- GROUP III
	Líquidos Penetrantes (PT)	CAL-INCONEL 718	ACEPTABLE	PQR – CAL- GROUP III
	Rayos X (RX)	CAL-INCONEL 718	ACEPTABLE	PQR – CAL- GROUP III

FECHA DE RESULTADOS DE LA PRUEBA <i>Certification date</i> 10/05/2014	VÁLIDEZ: INDEFINIDA CON REGISTROS SEMESTRALES <i>Validity: Indefinitely provided an auditable records every 6 months.</i>
---	--

La persona mencionada en el anverso de este documento está cualificada de acuerdo con código AWS D17.1:2001 dentro de los límites de soldeo anteriormente especificados según el proceso de soldadura utilizado en este prueba de soldeo. *The above named individual is qualified in accordance with code AWS D17.1:2001 within the above limits for the welding process used for this test weld.*



Mireia Gaona Latorre  
CWI 14031491  
QC1 EXP. 3/1/2017

Mireia Gaona Latorre

AWS Certified Welding Inspector CWI N° 14031491

<b>OBSERVACIONES:</b> Solo valido para soldadura en reparaciones de piezas, no para fabricación o correcciones de piezas de fabricación. <i>Only for weld repair applications. Not for fabrication. Not for corrections encountered during original manufacturing.</i>	
<b>MANTENIMIENTO DE LA CUALIFICACIÓN POR EL RESPONSABLE / COORDINADOR DEL SOLDADOR DE LA EMPRESA CON REGISTROS DOCUMENTALES CADA 6 MESES.</b> EXTENDED VALIDITY OF THE QUALIFICATION BY EMPLOYER / WELDING COORDINATOR EVERY 6 MONTHSWITH RECORDS.	
<b>Antes de / Before 10/11/2014</b>  <b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo: Position</b>	<b>Antes de / Before 10/11/2016</b>  <b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo: Position</b>
<b>Antes de / Before 10/05/2015</b>  <b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo: Position</b>	<b>Antes de / Before 10/05/2017</b>  <b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo: Position</b>
<b>Antes de / Before 10/11/2015</b>  <b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo: Position</b>	<b>Antes de / Before 10/11/2017</b>  <b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo: Position</b>
<b>Antes de / Before 10/05/2016</b>  <b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo: Position</b>	<b>Antes de / Before 10/05/2018</b>  <b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo: Position</b>

Figura 51: WPQ del soldador para soldar materiales del Grupo IIIa y IIIb bajo el rango de calificación indicado.



### 4.2.3. Calificación soldadores en el resto de grupos.

En la Tabla 16 se muestran las diferentes pruebas de calificación que ha realizado el soldador. Para todas las pruebas se soldaron 3 probetas de chapa a tope en posición 1G.

Grupo	Material	Corriente	Polaridad	Espesor Metal base (mm)	Diam. Varilla (mm)	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Electrodo
Ila	Acero Inox	CC	Directa	1,2	0,8	30-40	9.5-10.5	EWCe-2
IIIb	Níquel	CC	Directa	1,2	0,8	25-35	8.5-9.5	EWCe-2
IV	Aluminio	CA	N/A	2.0	1,2	85-95	13.0-14.0	EWP
V	Magnesio	CA	N/A	2.0	1,2	85-95	12.5-13.5	EWP
VI	Titanio	CC	Directa	1,6	1,2	50-60	10-10.8	EWCe-2
VII	Cobalto	CC	Directa	1,2	0,9	35-45	9.0-10.0	EWCe-2

**Tabla 16: Resumen de las variables utilizadas en la calificación de soldadores para los diferentes grupos de materiales.**

Por lo tanto en el presente proyecto se calificó satisfactoriamente a un soldador TIG manual en los materiales, espesores y posiciones mostradas en la Tabla 17.

GRUPO	MATERIAL CALIFICADO	Posiciones Calificadas				Espesor Calificado (mm)			
		Chapa a tope	Chapa en ángulo	Tubo a tope	Tubo en ángulo	Chapa a tope	Chapa en ángulo	Tubo a tope	Tubo en ángulo
II	Acero Inox	1G	1F, 2F	1G	1F	0.8-4.8	>1.6-4.8	0.8-4.8	>1.6-4.8
IIIb	Níquel	1G	1F, 2F	1G	1F	0.8-4.8	>1.6-4.8	0.8-4.8	>1.6-4.8
IV	Aluminio	1G	1F, 2F	1G	1F	1.34-8.0	>1.6-8.0	1.34-8.0	>1.6-8.0
V	Magnesio	1G	1F, 2F	1G	1F	1.34-8.0	>1.6-8.0	1.34-8.0	>1.6-8.0
VI	Titanio	1G	1F, 2F	1G	1F	1.1-6.40	>1.6-6.4	1.1-6.40	>1.6-6.4
VII	Cobalto	1G	1F, 2F	1G	1F	0.8-4.8	>1.6-4.8	0.8-4.8	>1.6-4.8

**Tabla 17: Rango de espesores y posiciones calificadas según grupo de material**

A continuación se resumen peculiaridades de la soldadura para cada grupo de material calificado.

#### 4.2.3.1. Soldadura TIG de aceros inoxidables

Los aceros inoxidables austeníticos tienen un elevado coeficiente de expansión térmica y una baja conductividad térmica (en comparación con los aceros ferríticos), por lo que tras soldarlos suelen presentar tensiones residuales y deformación por acumulación de calor.

Los principales precipitados que aparecen en la soldadura de inoxidables austeníticos son: ferrita- $\delta$ , fase  $\sigma$ , y carburos  $M_{23}C_6$  y  $M_6C$ .

La aparición de carburos precipitados puede disminuir la resistencia a corrosión del acero (especialmente por picaduras). Estos carburos no suele ser un problema en el cordón de soldadura, ya que se suelen soldar con varillas de aporte con bajo contenido de carbono, o con varillas de materiales estabilizados (como el AISI347 que se ha utilizado para la calificación en el Grupo II). En cambio, esta precipitación de carburos produce corrosión en la Zona Afectada Térmicamente (ZAT).

Tras la soldadura puede generarse segregaciones químicas de bajo punto de fusión en los bordes de grano, especialmente en el centro de los cordones, que pueden disminuir la ductilidad del material produciendo fisuraciones en caliente. Este fenómeno es muy común en aceros totalmente austeníticos (como es el caso del AISI 304 utilizado para la calificación).

Los aceros inoxidable austeníticos deben soldarse con cordones de soldadura estrechos, limitando la acumulación de calor y el tiempo de exposición a altas temperaturas. Es recomendable realizar secuencias de soldadura para repartir las tensiones y el calor aportado en toda la pieza, de manera que el cordón no esté expuesto a una excesiva sollicitación de tensiones. También es aconsejable limitar la temperatura entre pasadas y del material base a un máximo de 150°C.

También es necesario realizar una purga por la parte trasera del cordón. Ello es indispensable para evitar que el metal fundido se cristalice en contacto con la atmósfera. Este efecto debilita considerablemente la soldadura y el metal de base cercano a la unión.

#### **4.2.3.2. Soldadura TIG de aleaciones de aluminio**

La temperatura de fusión del aluminio puro es de 600°C y la de las aleaciones de aluminio de 500-560°C. Estas temperaturas son bajas en comparación con las del acero (~1535°C) y la del cobre (~1082°C).

Las aleaciones de aluminio se sueldan con CA. El decapado de la pieza tiene lugar cuando el electrodo se encuentra en el semiciclo positivo y el electrodo se calienta. El arco eléctrico decapa la superficie de la pieza eliminando el óxido y la envoltura del gas inerte previene la contaminación del baño. Cuando actúa el semiciclo negativo, el electrodo se enfría y no se produce el decapado de la pieza, pero la penetración es buena. Como resultado, en corriente alterna se consigue una penetración y limpieza intermedias

Las aleaciones de aluminio conducen el calor tres veces más rápido que el acero, por lo que se necesita un aporte térmico mayor para soldar piezas de aluminio que una de acero con las mismas dimensiones. Se recomienda realizar un precalentamiento previo en piezas de gran espesor para conseguir una buena fusión.



Un problema de la soldadura de las aleaciones de aluminio no cambian de color durante el calentamiento, por lo que se corre el riesgo de perforar la pieza durante la soldadura. Las habilidades y conocimientos del soldador son muy importantes a la hora de soldar estos materiales.

Las aleaciones de aluminio se dilatan dos veces más que el acero al calentarse, lo que puede provocar grandes tensiones internas y deformaciones durante la soldadura. También presentan tendencia a disminuir de la separación de la raíz en las piezas a tope. La soldadura a velocidades lentas y con gran cantidad de metal de aporte incrementa las deformaciones y la tendencia a la rotura.

En las aleaciones de aluminio, en presencia de aire, se forma alúmina (óxido de aluminio) con gran facilidad. Este óxido tiene una temperatura de fusión muy elevada, entre 1200°C y 2000°C. Por tanto el aluminio funde antes que su óxido y, cuando esto sucede, la película de óxido impide la fusión entre el metal base y el metal de aporte.

En algunas ocasiones, y debido a una mala limpieza, se puede quedar atrapado algún óxido en el baño de fusión que dará lugar a una imperfección en la soldadura.

Se utilizan electrodo de tungsteno puro EWP (color verde) para la soldadura con CA. Después del soldeo la punta del electrodo debe quedar en forma de media esfera brillante. En la siguiente figura se muestra la forma del electrodo para en soldeo con CA de aleaciones de aluminio (Figura 52)



Figura 52: Electrodo EWP con la punta redondeada tras soldar con CA.

#### 4.2.3.3. Soldadura TIG en aleaciones de titanio

El titanio reacciona absorbiendo nitrógeno y oxígeno de la atmósfera desde los 25°C hasta los 650°C causando fragilidad en su estructura cristalina. Esta reactividad supone una pérdida de ductilidad y resistencia mecánica provocando una decoloración del material (Figura 53). Es fundamental soldar el titanio bajo atmosferas protectoras ya sea utilizando difusores de gas en la antorcha para proteger mejor el fundido o en burbujas de soldadura

(Figura 54). Se deberá esperar que la temperatura del metal haya descendido por debajo de los 400°C antes de suprimir el flujo de gas de protección.



Figura 53: Ejemplo de un cordón de soldadura de titanio con una zona con decoloración y otra parte del cordón bien protegida

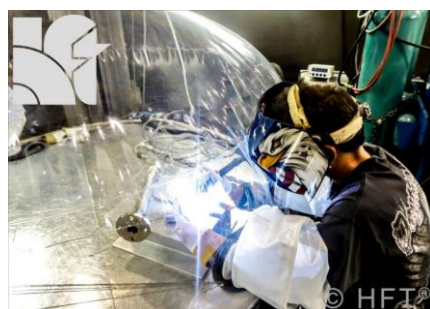


Figura 54: Soldadura de titanio en cámara protectora con atmósfera de argón  
(<http://www.huntingdonfusion.com>)

#### 4.2.3.4. Soldadura TIG en Aleaciones de Magnesio

El proceso de soldadura es similar al de las aleaciones de aluminio. Se forma una película de óxido en la superficie, que se elimina fácilmente cuando los electrones fluyen desde la pieza hacia el electrodo (polaridad inversa). Esta acción de limpieza del óxido no se verifica cuando se trabaja con polaridad directa. Este tipo de acción limpiadora, necesaria en el soldeo del aluminio y del magnesio, no se precisa en otros tipos de metales y aleaciones. En la práctica se utiliza CA como en la soldadura de aluminio.

La limpieza del óxido se atribuye a los iones de gas, cargados positivamente, que son atraídos con fuerza hacia la pieza, tienen suficiente energía para romper la película de óxido y limpiar el baño de fusión. En general, la corriente alterna es la que permite obtener mejores resultados en la soldadura del aluminio y del magnesio.

Cuando se suelda magnesio es necesario realizarlo en un lugar abierto y lejos de todo material inflamable. El magnesio arde y puede soportar su propia combustión. En términos prácticos, la única forma en que se puede extinguir el fuego es dejar que se consuma todo el metal.

Se utiliza un cepillo de acero inoxidable para remover el óxido blanquecino de la superficie. Si esto resultara insuficiente, se pueden usar productos químicos para su decapado.





#### **4.2.3.5. Soldadura TIG en aleaciones base cobalto**

Las aleaciones de cobalto son fáciles de soldar. Algunas aleaciones son mucho más fáciles de soldar que ciertos aceros inoxidable.

No se deben utilizar utillajes fabricados con cobre para soldar materiales de base cobalto. La inclusión de átomos de cobre en la estructura atómica del cobalto podría causar grietas. Se recomiendan utilizar utillajes de aluminio o níquel.

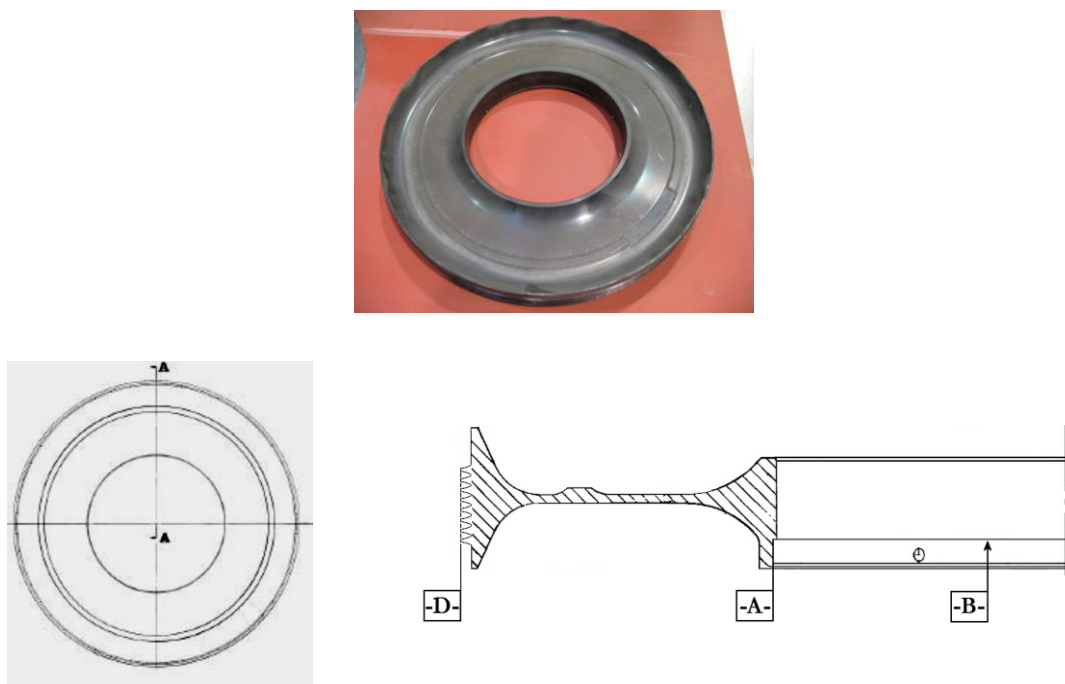
Utilizar intensidades bajas para evitar grietas longitudinales en el cordón de soldadura y tensiones residuales.



## 5. HOMOLOGACIÓN Y SUSTENTACIÓN DE LA REPARACIÓN DE UN CIERRE DE CUCHILLAS POR SOLDADURA TIG.

Durante una revisión de overhaul de un tipo concreto de motor, es habitual detectar daños y desgastes en los cierres de cuchillas de HPT (Turbina de alta presión). Estos cierres suelen reemplazarse por otros nuevos ya que en el manual de mantenimiento del fabricante no incluye una instrucción para reparar las cuchillas.

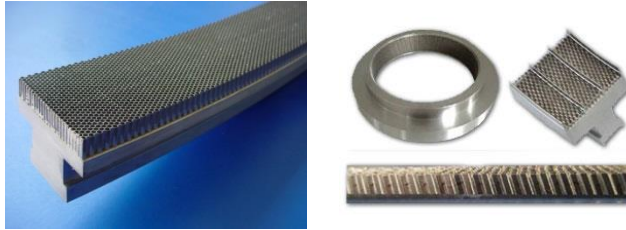
Como centro reparador se propuso al fabricante del motor una instrucción de reparación para poder recrear las cuchillas mediante soldadura. El fabricante solicitó una sustentación del proceso para su aprobación. El cierre de cuchillas que se utilizó para la sustentación del proceso se muestra en la Figura 55.



**Figura 55:** Cierre de cuchillas de HPT con el que sobre el que se realizó la sustentación del proceso.

Los cierres de cuchilla pueden encontrarse en la zona del compresor o de la turbina. Cuando están en funcionamiento, las cuchillas rozan con la parte adyacente del cierre fabricada con materiales abrasables como níquel-grafito o con panel de abeja (honeycomb). Debido al rozamiento las cuchillas se desgastan y, en consecuencia, acontece una pérdida de la eficacia del cierre. Los sellos de panel de abeja han sido una mejora para los cierres de cuchilla, ya que las cuchillas sufren menos degradación en comparación con los sellos

abradables. Ejemplos de cierres de panel de abeja o honeycomb se muestran en la Figura 56. En el motor también se pueden encontrar otro tipo de cierres como son los cierres de cepillo o sellos laberínticos.



**Figura 56: Muestra de diferentes cierres honeycomb.**

La función principal de un cierre de cuchillas en una turbina es la de controlar el flujo de aire para equilibrar las diferencias de presiones entre las etapas. De esta manera se evita la entrada de aire caliente en el centro de los discos y, en consecuencia, se reducen las cargas aplicadas a los cojinetes.

Los sellos de HPT, al encontrarse en la zona de la turbina más próxima a la cámara de combustión, están sometidos a elevadas temperaturas y presiones de gas. Por lo tanto, la oxidación, los ciclos térmicos y la fuerza centrífuga a la que está sometido el cierre de cuchillas constituyen un entorno agresivo contra la integridad de la pieza. A este ambiente agresivo hay que sumarle la presencia de azufre, vanadio o sodio en los gases que salen de la cámara de combustión. Este tipo de contaminantes se forman al quemar el combustible en la cámara de combustión.

Por este motivo, los cierres de HPT requieren estar fabricados con materiales con buenas propiedades mecánicas. Los materiales de fabricación deben tener buena resistencia a la fluencia, a la fatiga de bajo número de ciclos (LCF) y a las tensiones térmicas. Por lo general, el daño por fluencia resulta de las diferencias de presión entre etapas y de las fuerzas centrífugas, mientras que el daño LCF es una consecuencia del ciclo mecánico y térmico de la turbina. En aeronáutica se considera que 1 ciclo de vuelo = 1 despegue + 1 aterrizaje (etapas críticas para la aeronave).

Se puede concluir que los dos mecanismos principales responsables de la pérdida de las dimensiones de los sellos de cuchillas durante el servicio son:

- a) la erosión por el roce entre las cuchillas y la parte adyacente durante la rotación.
- b) la fluencia por las diferencias de presión y fuerzas centrífugas.



## 5.1. Descripción, composición química y fases presentes del material base.

El fabricante del motor proporcionó un cierre no reparable (pieza scrap) para poder realizar la sustentación del proceso de reparación. De acuerdo con la información dada por el fabricante, el sello scrap pertenece a la 1ª-2ª etapa de la turbina. Aunque la velocidad de rotación y la temperatura a la que está sometido el cierre no fueron proporcionadas, los cierres de turbina de la 1ª-2ª etapa en motores turbofan giran en torno 20000-21000 rpm y operan a temperaturas relativamente elevadas de 500-600°C (las temperaturas dentro de la cámara de combustión pueden llegar a alcanzar 1100°C).

El plano de fabricación indica que la pieza está fabricada con AMS 5661. La especificación AMS 5661 corresponde a Inconel 901 en forma de barras forjadas e indica que el estado final del material se alcanza tras un tratamiento térmico de solubilización y de precipitación. Inconel 901 es una superaleación base Ni-Fe-Cr que recibe otras designaciones comerciales tales como Incoloy 901, Nimonic 901 o Alloy 901, y recibe designaciones de standards como UNS N09901, W.Nr.2.4662, AMS 5660 o AMS 5661 [12], [13].

Inconel 901 se considera una aleación endurecible por precipitación ya que obtiene sus mejores propiedades mecánicas después de un tratamiento térmico de envejecido. También presenta otros mecanismos de endurecimiento como por ejemplo la precipitación de carburos y la sobresaturación de solución sólida, pero tienen menor impacto en las propiedades mecánicas

### 5.1.1. Composición química Inconel 901

La composición química de Inconel 901 se resume en la Tabla 18. Debido a su elevado contenido en hierro, el Inconel 901 está dentro del grupo de las superaleaciones base Ni-Fe como Haynes 556, A-286 o Incoloy 800.

### 5.1.2. Estructura Inconel 901

Las superaleaciones base Ni-Fe presentan una microestructura peculiar, causante de sus excelentes propiedades. Las principales fases de estas superaleaciones son:

- Fase  $\gamma$  (Austenita): Solución sólida centrada en las caras que actúa como matriz.
- Fase  $\gamma'$ : Dispersión de precipitados intermetálicos ordenados intermetálicos, responsable de la gran resistencia de las superaleaciones. Las fórmulas

estequiométricas de esta fase son:  $Ni_3Al$ ,  $Ni_3Ti$  o  $Ni_3(Al,Ti)$ .

- Carburos MC: El contenido de carbono es relativamente bajo (<0,1%) y se une a los elementos formadores de carburo: Ti, Mo y Cr.

Además de estas fases existen otras fases no deseables que pueden formarse durante sobrevejecido o sobrecalentamiento como las fases G,  $\sigma$ ,  $\mu$  y Laves.

Elemento	Ni	Fe	Cr	Mo	Ti	Co	Cu	Mn	Si	Al	C	S
Contenido %	40-45	Bal	11.0-14.0	5.0-6.5	2.7-3.1	<1.0	<0.5	<0.5	<0.4	<0.35	<0.1	<0.03

**Tabla 18: Composición química del Inconel 901**

La matriz de las superaleaciones de Ni-Fe está formada por una estructura austenítica y fcc reforzada con fase- $\gamma'$  dispersada en la matriz. En este tipo de material la resistencia aumenta al aumentar el contenido de fase- $\gamma'$  dispersada.

Los dos principales elementos aleantes, Cr y Mo, se añaden a la aleación como estabilizadores de la solución sólida reforzando la fase- $\gamma$  austenítica. Las adiciones de estos elementos implica la distorsión del parámetro de red de la fase  $\gamma$ . Así mismo, la adición de estos dos elementos provoca la precipitación de carburos en los límites de grano del tipo  $M_{23}C_6$  y  $M_7C_3$  para el Cr y  $M_6C$  y MC para el Mo

La adición de Cr promueve la formación de una capa de óxido estable en superficie de la aleación durante la exposición a alta temperatura. Esta capa protege la aleación contra ambientes corrosivos. La cantidad mínima Cr requerida en una superaleación Ni-Fe para promover la formación de una película de óxido continua es del 9% en peso.

La adición de Ti y Al facilitan la formación de una fase- $\gamma'$   $A_3B$  en la matriz austenítica, siendo el principal mecanismo de refuerzo para Inconel 901. Estos dos elementos son críticos en la aleación. Aunque el contenido de Ti y Al presente en la composición química IN901 es muy bajo, es suficiente para promover la formación de tales precipitados. Esto ocurre sólo cuando se añaden Cr y Mo en la aleación también, porque (como se mencionó anteriormente) Cr y Mo estabilizan la fase austenita, y ayudan a la disminución de la solubilidad Ti y Al en esta fase al mismo tiempo.

Los precipitados fase- $\gamma'$   $Ni_3(Al, Ti)$  son coherentes y ordenados. La coherencia entre la austenita  $\gamma$  y los precipitados  $\gamma'$  afecta a la resistencia final de la aleación. A medida que aumenta la relación  $Ti,Al/Ni$ , el parámetro de red de la fase- $\gamma$  también se incrementa. Sin



embargo, esta relación se debe controlar cuidadosamente, ya que un exceso de Ti/Al (aproximadamente a 2:1 en proporción atómica) puede conducir a la formación de una fase metaestable- $\gamma''$ , que puede transformar a fase- $\eta$  estable ( $\text{Ni}_3\text{Ti}$ ) durante la exposición a altas temperaturas y disminuir drásticamente las propiedades mecánicas de la aleación. Por ejemplo, la formación de fase  $\eta$  disminuye significativamente la resistencia y la ductilidad de la aleación. Esta fase suele formar durante la exposición de servicios de largo plazo, sin embargo, su formación también puede obtenerse a partir de procesos de forja y tratamientos térmicos. Para evitar su formación, se recomienda trabajar la aleación a temperaturas por debajo 800-850°C y realizar tratamientos térmicos de solución por encima de 900°C para disolverlos. Las adiciones de Al, que entra en sustitución de Ti en la fase  $\gamma$ , retardan esta transformación.

La formación de carburos es un mecanismo secundario de endurecimiento de la aleación. Básicamente los carburos MC se forman durante la solidificación de la aleación fundida y durante el trabajo en caliente para refinar el tamaño de grano. Los carburos también pueden precipitar en los límites de grano durante un mecanizado, un tratamiento térmico o durante el servicio de la pieza.

El precipitado de carburos en los límites de grano tiene efectos beneficiosos si son de tipo globular, sin embargo en forma laminar pueden causar la fragilización de la aleación. TiC es el principal carburo formado en las aleaciones de Ni-Fe, si contienen Ti como elemento aleante. Otros carburos frecuentes en la estructura del Inconel 901 son  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Mo}_6\text{C}$  y  $\text{MoC}$ .

IN901, como otras aleaciones de Ni-Fe, es propenso a la formación de fases frágiles, tales como G,  $\sigma$ ,  $\mu$  y Laves. El envejecido del material puede conducir a la formación de estas fases, en detrimento de las propiedades mecánicas de la aleación. La formación de estas fases puede evitarse controlando la composición química de la aleación, mediante tratamientos térmicos y limitando la temperatura de servicio.

En la Tabla 19 se encuentra a modo de resumen los efectos que tienen los elementos aleantes en la estructura de las superaleaciones Ni-Fe.

Elemento	Endurecimiento de la matriz	Incremento de Vf $\gamma'$	Fases en los límites de grano	Otros efectos
Cr	Moderado	Moderado	M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> y M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Mejora la resistencia a la corrosión Promueve fases TCP
Mo	Alto	Moderado	M <sub>6</sub> C y MC	Promueve fases TCP
W	Alto	Moderado		
Ta	Alto	Alto		
Nb	Alto	Alto	NbC	Promueve fases $\delta$ , $\gamma''$
Ti	Moderado	Muy alto	TiC	Reduce resistencia a la oxidación
Al	Moderado	Muy alto		Mejora resistencia a la oxidación
Fe		$\gamma' \rightarrow \beta$ , $\eta$ , $\delta$ , $\gamma''$		
Co	Leve	Moderado		
Re	Moderado			
C	Moderado		Carburos	
B, Zr	Moderado			Inhibe el agrandamiento de carburos Mejora la resistencia en los límites de grano Mejora la ductilidad y la resistencia a la fluencia

Tabla 19: Resumen del efecto de los aleantes en superaleaciones Ni-Fe. (Vf: Fracción de volumen)

### 5.1.3. Endurecimiento por precipitación

El endurecimiento por precipitación es el método más importante para aumentar la resistencia mecánica de los metales no ferrosos por reacción en el estado sólido. Este proceso tiene lugar en una aleación cuando una fase de transición finamente dispersa precipita a partir de una solución sólida sobresaturada.

Para que una aleación binaria pueda ser endurecible por precipitación es necesario que el elemento de aleación presente una solubilidad en estado sólido creciente con la temperatura y tenga un diagrama de equilibrio como el de la Figura 57.

El proceso de endurecimiento por precipitación consiste en elevar la temperatura hasta T<sub>4</sub>, de modo que la aleación está constituida por una sola fase  $\alpha$ , con todos los elementos disueltos.

Si la aleación se enfría lentamente desde la temperatura de puesta en solución (T<sub>4</sub>) hasta una temperatura inferior (T<sub>3</sub>), la solución sólida  $\alpha$  tiende a precipitar partículas de fase  $\beta$ , lo cual no contribuye al endurecimiento de la aleación por lo grueso de precipitado y por la escasa cantidad de precipitados por unidad de volumen.

En cambio, si la aleación se enfría rápidamente hasta T<sub>1</sub> después de la puesta en solución, se obtiene una solución sólida metaestable, sobresaturada de soluto, formando una solución





sólida substitucional.

Si se calienta nuevamente la solución sobresaturada hasta una temperatura  $T_2$  y se mantiene durante un cierto tiempo, se produce un precipitado fino de la fase  $\beta$ , disperso en la matriz, que mejora las propiedades mecánicas. Es el denominado tratamiento de envejecido. Un exceso de tiempo o de temperatura dará lugar a un sobre-envejecido con pérdida de características.

El Inconel 901 se comercializó en un principio en estado precipitado tras un tratamiento térmico de solubilización. Más adelante se observó que un tratamiento térmico de estabilización entre el solubilizado y el envejecido mejoraba la resistencia a fluencia de la superaleación.

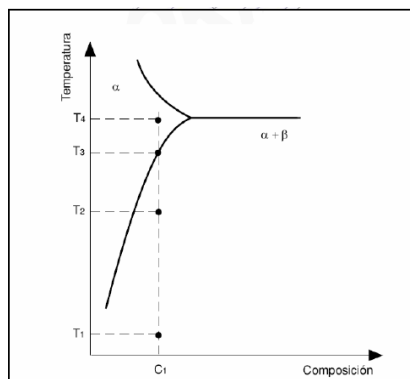


Figura 57: Detalle del diagrama de fases típico de aleaciones endurecibles por precipitación.

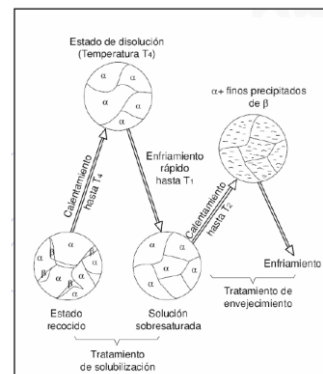


Figura 58: Esquema de la evolución de las fases durante el proceso de envejecido.

#### 5.1.4. Propiedades físicas Inconel 901

Algunas de las principales propiedades físicas de Inconel 901 se resumen en la Tabla 20.

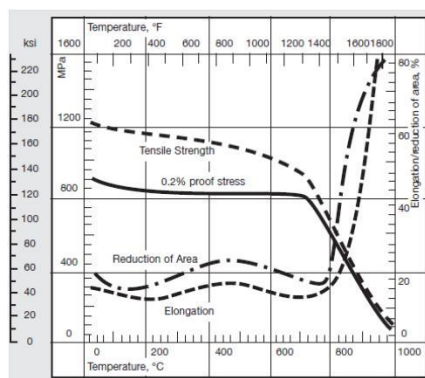
Propiedades físicas	
Densidad (mg/m <sup>3</sup> )	8.14
Rango de fusión (°C)	1280-1345
Calor específico (J/gk°C)	431 a 20°C
Coeficiente de expansión térmica (μm/m°C)	
• 20-600	15.0
• 20-800	16.1
• 20-1000	19.9
Dureza	
• Estado recocido 1093°C, 2h	156-183 HV
• Estado envejecido a 1093°C, 2h, WQ +787°C 2h AC + 718°C 24h AC	318-412 HV
• Estado envejecido a 1010°C, 2h, WQ +718°C 2h AC + 648°C 24h AC	341-446 HV

Tabla 20: Propiedades físicas Inconel 901.

#### 5.1.5. Propiedades mecánicas del Inconel 901

El Inconel 901 presenta una alta resistencia a la tracción, a la fluencia (creep) y a la rotura

por fluencia (creep strength) en el intervalo de temperatura de 538-760°C. En este intervalo de temperaturas, sus propiedades de resistencia a la tracción son superiores a los de otras superaleaciones de Ni-Fe tales como el A-286. A temperaturas superiores a 760°C pierde propiedades (Figura 59) y se utilizan aleaciones más aleadas, como Inconel 718 o Waspalloy.



**Figura 59: Variación de las propiedades mecánicas del Inconel 901 con la temperatura.**

Inconel 901 tiene una mejor maquinabilidad y forjabilidad en comparación a otras aleaciones base níquel endurecidas por precipitación (por ejemplo Waspalloy) y ofrece una buena resistencia a la oxidación y la corrosión. Se mecaniza mejor en estado recocido, sin embargo se recomienda mecanizar en estado totalmente precipitado para mantener las dimensiones finales. En contraste con estas propiedades mecánicas, su soldabilidad no es particularmente buena y suele hacerse por métodos de fusión con arco eléctrico. Al igual que para mecanizar, se recomienda soldar en estado solubilizado (recocido) con material de aporte con la misma composición.

Debido a sus propiedades, esta aleación es ampliamente utilizada en aeronáutica, especialmente en la zona de la turbinas en cierres, discos, ejes y espaciadores, entre otros.

## 5.2. Proceso experimental

### 5.2.1. Proceso de reparación propuesto

Las reparaciones tienen que dejar la pieza con las dimensiones y propiedades originales del plano de fabricación. Si la pieza no se restaura a las condiciones originales, se considera una modificación y el proceso de sustentación sería totalmente diferente al que se muestra en este documento.

El siguiente procedimiento de reparación aplica únicamente a la restauración del filo de la



cuchilla. Otros defectos reparables asociados a la pieza, como es la restauración del diámetro interior del cierre por niquelado o el blending de defectos superficiales, no se muestran en esta instrucción de reparación.

Los pasos a seguir en la reparación de las cuchillas se muestra a continuación:

1. Limpiar y desengrasar la pieza teniendo especial cuidado para evitar daños. Se utilizaran Prácticas Estándards de limpieza aplicables a las piezas base níquel.
2. Inspeccionar la pieza de acuerdo con el Manual de Reparaciones del fabricante. Inspeccionar las cuchillas en busca de daños. En el caso de que las cuchillas estén dañadas proceder con la reparación.

NOTA: Si existe un descentramiento radial del diámetro interior del cierre, llevar primero a cabo la reparación de este diámetro mediante procesos de niquelado (esta operación no se describe en este documento).

3. Eliminar los restos de recubrimiento de las cuchillas mediante un chorreado abrasivo (grit blasting).
  - a. Enmascarar las áreas adyacentes de las cuchillas para evitar la erosión por partículas abrasivas. Enmascarar con cinta o utillajes.
  - b. Chorrear el recubrimiento de las cuchillas con alúmina G24. Utilizar 3,8 a 4,2 bar de presión. Colocar la boquilla durante el chorreado a 90º para obtener resultados óptimos.
  - c. Eliminar la alúmina residual de la pieza usando aire comprimido limpio y seco.
4. Realizar un tratamiento térmico de solubilización según AMS5661. Calentar la pieza hasta 1066-1093°C durante 1 hora y luego, enfriar la pieza con aire forzado.
5. Montar la pieza en el útil de mecanizado para fijarla en el torno. Si el descentramiento está fuera de los límites llevar a cabo la reparación niquelado del diámetro interno (no se muestra en este documento). Mecanizar el diámetro exterior (las cuchillas) hasta dejar un espesor de 1-1,2mm en cada cuchilla. Registrar las dimensiones del diámetro externo mecanizado.

NOTA: Este mecanizado no debe eliminar el material de base por debajo de la base de las cuchillas. Esta eliminación de material proporcionará una base para añadir el metal fundido durante la soldadura.

6. Inspeccionar la zona mecanizada por Líquidos penetrantes (IPF). Las piezas rotatorias deben ser inspeccionadas utilizando el proceso tipo 1, el método D, el nivel de Sensibilidad 4. No están permitidas grietas.
7. Limpiar y desengrasar la pieza teniendo especial cuidado en la zona de cuchillas para evitar daños. Utilizar Prácticas Estándares aplicables a las piezas base níquel.
8. Recreer las cuchillas del cierre mediante soldadura TIG por arco pulsado. Utilizar varilla AMS5660H (Inconel 901) como material de aporte. Proteger la soldadura con argón de respaldo. Utilizar galgas si es necesario centrar la pieza en la mesa de la máquina. Usar las instrucciones dadas en la WPS XXX-ORB-01 (Se muestra en el punto 5.3.9 de este proyecto)
9. Realizar un tratamiento térmico de solubilizado, estabilizado y posteriormente un tratamiento térmico de envejecido de acuerdo con AMS5661, para restaurar las propiedades mecánicas de la aleación. Realizar tratamiento térmico de solubilizado como en el punto 4 y, a continuación, estabilizar la pieza en el horno de vacío de 774 a 802°C durante 2 a 4 horas y luego, enfriar con aire forzado.
10. Realizar tratamiento térmico de precipitación en el horno de vacío en 704 a 746°C durante 24 horas y, a continuación, enfriar en aire forzado.
11. Inspeccionar las cuchillas mecanizadas mediante líquidos penetrantes (PT). Las piezas rotatorias deben ser inspeccionadas utilizando el proceso tipo 1, el método D, el nivel de Sensibilidad 4. No están permitidas grietas.
12. Enmascarar con cinta o utilizando utillajes todas las áreas que no vayan a ser recubiertas por proyección térmica.
13. Chorrear la pieza utilizando alúmina G24 a 2-7bar de presión. Colocar la boquilla a 200- 250 mm distancia de la superficie de la pieza con un ángulo de 45-90°. Limpiar los restos del abrasivo con aire a presión. Recubrir las cuchillas por proyección térmica antes de 2h.



14. Recubrir las cuchillas mediante plasma atmosférico con Cr3C2-(Ni 20Cr) con un espesor de 0.05-0.1 mm (0.002-0.004inch).
15. Realizar una inspección visual de la pieza reparada.

## 5.2.2. Equipo de soldadura

Las piezas se soldaron con una máquina de soldadura orbital TIG LAWS4000 Liburdi automática, utilizando argón como gas de respaldo y protección. Se conoce como soldadura orbital el proceso de soldar circularmente una pieza cilíndrica fija o fijada en un soporte (conductos, tuberías, etc). Para este propósito, la antorcha se desplaza sobre una guía y recorre la pieza de manera circular. Esta es la razón por la cual el proceso recibe su nombre, pues la palabra "Orbit" viene del latín y se refiere al movimiento de la luna alrededor de la tierra. Con esta técnica se esperan resultados reproducibles y de alta calidad.

## 5.2.3. Etapas críticas de la reparación

### 5.2.3.1. Preparación de la pieza para soldar

Para obtener soldaduras de calidad, la superficie a soldar debe estar limpia de cualquier contaminante. La pieza se limpió de posibles óxidos con papel de lija o Scotch-Britte y se desengrasó con acetona (Figura 60).



Figura 60. Remoción de óxidos y limpieza de las cuchillas antes de soldar con a) Scotch Britte y b) acetona.

### 5.2.3.2. Tratamientos térmicos

Anteriormente se mencionó, que las propiedades mecánicas óptimas para las superaleaciones base níquel se pueden obtener mediante tratamientos térmicos.

Los tres tratamientos térmicos se llevaron a cabo durante la sustentación del proceso fueron un solubilizado, una estabilización y un precipitado. Todos los tratamientos se realizaron en un horno de vacío y el enfriamiento se efectuó dentro del horno con argón inerte.

Por lo general, la estabilización de la fase austenítica y el tratamiento de envejecido para aleaciones de base de Ni-Fe se llevan a cabo conjuntamente, disminuyendo la temperatura desde la temperatura máxima de estabilización directamente a la temperatura máxima de envejecido. Sin embargo, se ha demostrado experimentalmente que para el Inconel 901 bajar la temperatura hasta temperatura ambiente tras tratamiento térmico de estabilización y luego realizar el envejecido proporciona un grano más fino, lo que resulta en una mejora de la resistencia a la fatiga y a la tracción.

#### 5.2.3.2.1 Tratamiento térmico de solubilización.

Se lleva a cabo calentando la pieza de 1066-1093°C durante 1 hora y enfriando con aire forzado. Este tratamiento térmico se incluye en la especificación AMS5661 sin embargo, existen otros posibles rangos de temperatura en la bibliografía, por ejemplo, entre 1080-1107°C y tiempos más largos de 1 a 2 horas.

El tratamiento térmico de solubilización se lleva a cabo antes y después de la soldadura. El tratamiento previo a la soldadura se recomienda para facilitar el proceso de soldadura. Este tratamiento disuelve las fases  $\gamma'$  y  $\eta$  precipitadas durante largos tiempos de exposición a sobretemperaturas en el motor. Para el Inconel 901 la temperatura de solubilización de estas fases son 940°C y 995°C respectivamente. Así pues, el tratamiento de solubilización disuelve estas fases dejando una matriz de austenítica con algunos carburos prevalectantes.

Después de la soldadura, el tratamiento térmico de la solubilización actuará como el tratamiento térmico de homogeneización, borrando segregaciones y solubilizando fases metaestables. Esto reduce el riesgo de grietas después del tratamiento térmico de envejecido.

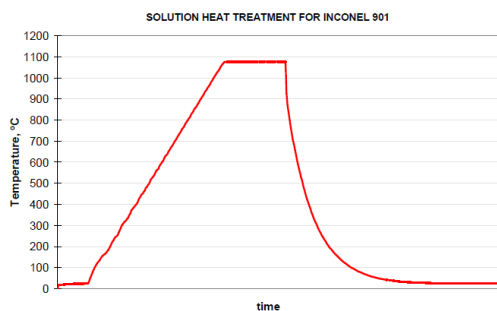


Figura 61: Ciclo térmico de solubilización para Inconel 901.



### 5.2.3.2.2 Tratamiento térmico de estabilización

La pieza se calienta a 774-802°C durante 2 a 4 horas y luego se enfría con aire forzado. Este tratamiento previo al envejecido ha demostrado experimentalmente una mejora en las propiedades de resistencia a la fluencia y la rotura por fluencia. Este efecto es similar a otras aleaciones de base de níquel. Se cree que esta mejora puede estar relacionada con una nucleación primaria de la fase  $\gamma'$  dispersada homogéneamente que provoca un mayor crecimiento durante el tratamiento de envejecido.

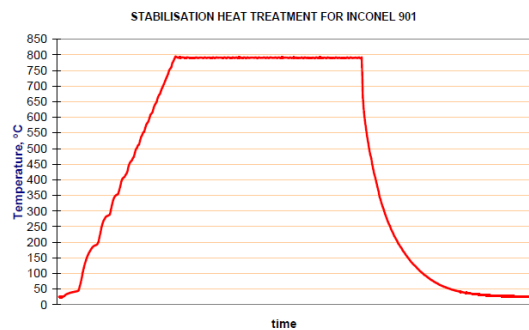


Figura 62: Ciclo térmico de estabilización para Inconel 901

### 5.2.3.2.3 Tratamiento térmico de precipitación

Se realiza de 704-746°C durante 23 a 25 horas y posteriormente se enfría la pieza con aire forzado. Las partículas  $\gamma'$  nuclean a esta temperatura partir de una matriz sobresaturada. La Dureza Vickers en este punto debe estar entre 341 a 446 HV<sub>0,2</sub>.

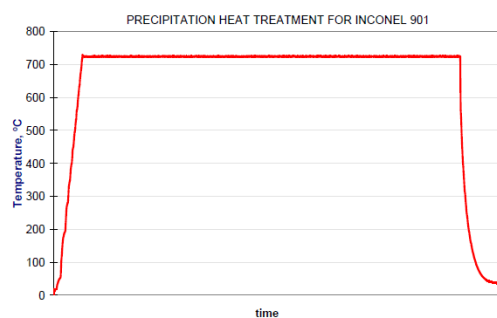


Figura 63 Ciclo térmico de envejecido para Inconel 901

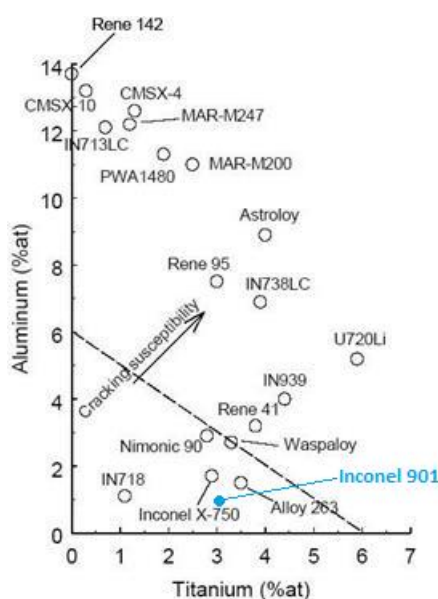
### 5.2.3.3. Mecanizado

El proceso de mecanizado de una superaleación endurecible por envejecido no es fácil. Si se mecanizan rápidamente, las altas presiones y temperaturas producidas durante el

mecanizado pueden causar un efecto de endurecimiento de la superficie mecanizada que ralentizara el mecanizado y pudiendo causar también deformaciones en piezas de espesor pequeño.

#### 5.2.3.4. Soldadura

Inconel 901 no es de las superaleaciones base níquel endurecibles por precipitación más difíciles de soldar (Figura 64). Por lo que la restauración de las cuchillas por soldadura es factible. Se recomienda soldar mediante técnicas de fusión por arco con gas inerte y en estado solubilizado. Tras la soldadura y antes de los tratamientos térmicos de estabilizado y precipitado también se recomienda volver a solubilizar el material.



**Figura 64: Diagrama de soldabilidad para algunas superaleaciones base Ni y Ni-Fe endurecibles por precipitación de fase  $\gamma'$ . [14]**

El personal que opere las máquinas de soldadura orbital por fusión, deberá ser calificado de acuerdo a los requerimientos de la especificación AWS D17.1. Dicha acreditación deberá ser supervisada y concedida por la correspondiente autoridad en soldadura (CWI). El operador de soldadura certificado dispondrá de un sello personal e intransferible con el que identificará todas las soldaduras que realice.

Las ventajas de la soldadura orbital son:

- Alta calidad en el cordón
- Resultados totalmente reproducibles
- Rentabilidad gracias al método automatizado





- Tiempos de producción cortos.

Para poder amarrar el cierre a la mesa giratoria y centrar el eje de rotación se fabricó un utillaje específico. El utillaje con el cierre montado se muestra en la Figura 65.

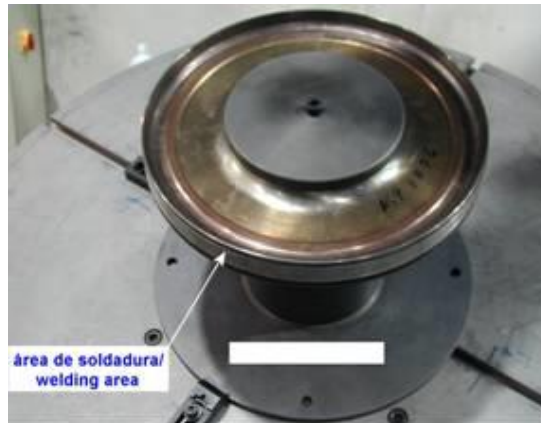


Figura 65: *Utillaje para montar el cierre de cuchillas en la mesa de la máquina de soldadura orbital.*

Se utilizó arco pulsado para recrecer las cuchillas. El arco pulsado se compone de impulsos de corriente. El material de aporte se añade con los picos de corriente alta y durante el pico de corriente baja, la antorcha avanza sin adición de material. El uso de esta técnica evita que la pieza se caliente en exceso y se obtiene un cordón de soldadura mediante la adición de múltiples gotas de metal fundido.

El mecanizado previo para eliminar las cuchillas dañadas deja bordes afilados en la zona a recrecer por soldadura. Por este motivo, en la primera vuelta se utilizó arco pulsado y sin adición de material de aporte para fundir el perfil agudo y dejar una superficie apta para depositar el metal fundido del aporte en las siguientes vueltas (Figura 66).

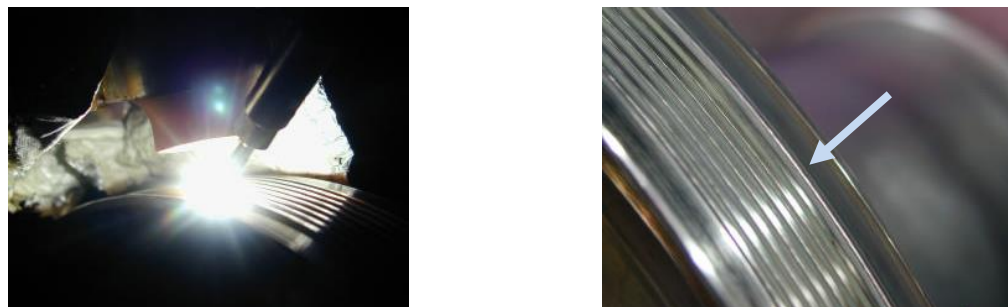


Figura 66. *a) TIG arco pulsado automático en las cuchillas b) aspecto visual una cuchilla después de la primera vuelta sin adición de aporte (flecha azul).*

### 5.2.3.5. Recubrimiento de las cuchillas

De acuerdo con la información dada por el fabricante, las cuchillas están recubiertas con una mezcla de un Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-(Ni20Cr). Este tipo de recubrimientos se suelen utilizar en las

cuchillas de cierres que operan de 540-815°C. Estos recubrimientos tienen buena resistencia a la erosión, al desgaste y a la corrosión en caliente. La adición de un intermetálico en la mezcla como NiCr evita que la descomposición del carburo de cromo durante la proyección térmica (debido a la pérdida de carbono a altas temperaturas que se alcanzan). La adición de NiCr también mejora la integridad del recubrimiento y la resistencia a la corrosión y al desgaste. El polvo comercial utilizado para recubrir las cuchillas fue Metco 81VF-NS (Sulzer Metco).

### 5.2.3.6. Inspección

Por lo general, el último paso de un proceso de reparación es la inspección visual. La pieza reparada debe inspeccionarse en su conjunto (no solo la zona reparada) por si tuviera defectos de menor importancia tales como arañazos, muescas, etc. Las piezas deben ser manipuladas con cuidado para evitar la generación de estos defectos. Todas las piezas deben estar protegidas con bolsas especiales de plástico durante su traslado entre las diferentes áreas del taller.

Todas las cuchillas del cierre deben de ser inspeccionadas mediante líquidos penetrantes (PT) después del mecanizado. No se realizaron Rayos X ya que debido a la geometría de la pieza es imposible conseguir información significativa (Figura 67).



**Figura 67: Ejemplo de una radiografía de un cierre. Se demuestra que es una técnica no apta para la inspección de cuchillas.**

Un aspecto importante a tener en cuenta en el perfil de las cuchillas mecanizadas es la posibilidad de obtener perfiles negativos o positivos entre la zona soldada y talón de la cuchilla original. La Figura 68 muestra ejemplos de este tipo de defectos y los límites permitidos por otros fabricantes.

El máximo perfil positivo establecido en Manuales de Reparación de otros motores es de



0.254 mm (0,010inch) y el negativo en 0.051 mm (0,002inch), sin embargo, es recomendable minimizar tales perfiles y dejar una superficie completamente lisa.

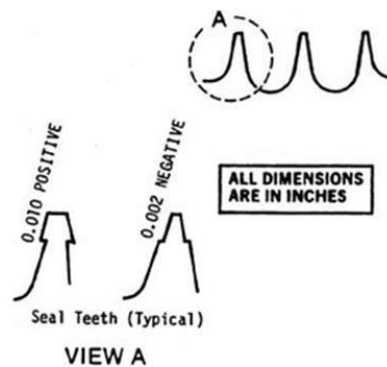


Figura 68: Requisitos de calidad en contornos de cuchillas.

### 5.3. Resultados

Para la sustentación de la instrucción de reparación, el fabricante del motor (OEM) solicitó metalografías de las cuchillas soldadas y medidas de microdureza Vickers. Los análisis térmicos y de stress fueron realizados por el fabricante (ya que es la autoridad de diseño del componente) y no se muestran en este proyecto por confidencialidad.

#### 5.3.1. Caracterización del material base.

Con el fin de caracterizar la microestructura del material del cierre y realizar ensayos de microdureza se mecanizó una probeta de la zona del diámetro interior (Figura 69).



Figura 69: Probeta obtenida del diámetro interior del cierre de cuchillas.

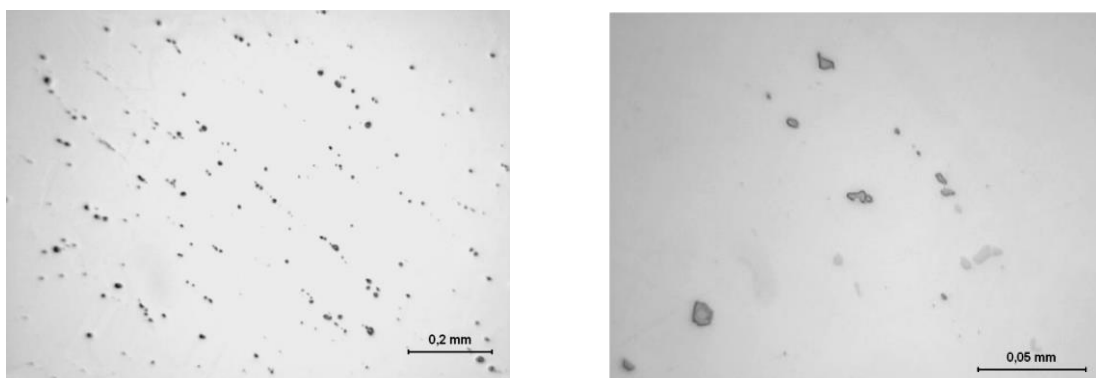
La composición química se determinó mediante un análisis de EDS (Energy Dispersive Spectroscopy / Espectroscopía de Energía Dispersa) para confirmar que la pieza está fabricada a partir de Inconel 901 (AMS5661). Los resultados obtenidos confirmaron el material (Tabla 21).

Elemento	Ni	Fe	Cr	Mo	Ti	Co	Cu	B	Si	Al	Mn	C	S
Contenido % (EDS)	43,92	33,43	12,62	5,79	3,05	0,37	0,17	0,18	0,12	0,35	---	--	--
Contenido% s/AMS5661	40-45	Bal.	11.0-14.0	5.0-6.5	2.7-3.1	<1.0	<0.5	---	<0.4	<0.35	<0.5	<0.1	<0.03

**Tabla 21: Composición química del cierre y comparación con la especificación AMS5661.**

Se realizaron 20 medidas de microdureza Vickers (HV) con cargas de 200 gramos. El valor obtenido fue  $440 \pm 15$  HV<sub>0,2</sub>. Los resultados confirman que el material está en estado precipitado y que es necesario realizar un tratamiento térmico de solubilizado antes de la soldadura para evitar defectos.

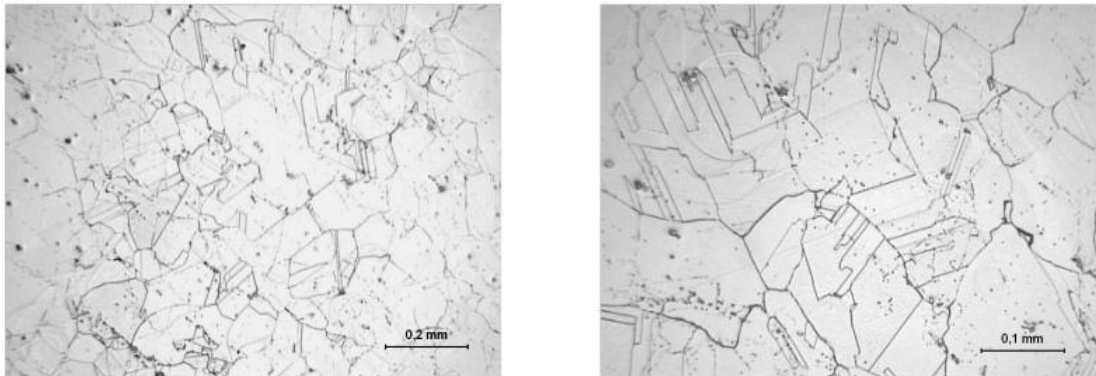
En la Figura 70 se muestran las micrografías obtenidas por microscopía óptica del material del cierre. Se observan precipitados de tamaños uniformes y distribuidos homogéneamente en la matriz.



**Figura 70: Microestructura del material base sin atacar. Se observan claramente carburos precipitados.**

La muestra fue atacada químicamente con glyceragia (1,2ml HCl, 0,4ml HNO<sub>3</sub>, 0,4ml CH<sub>3</sub>COOH y dos gotas de glicerina) para revelar su microestructura. La estructura está formada por granos equiaxiales de diferentes tamaños. El ataque químico revela precipitados dentro y en los límites de grano. Estos precipitados se identificaron como carburos tras el análisis por microscopía electrónica.

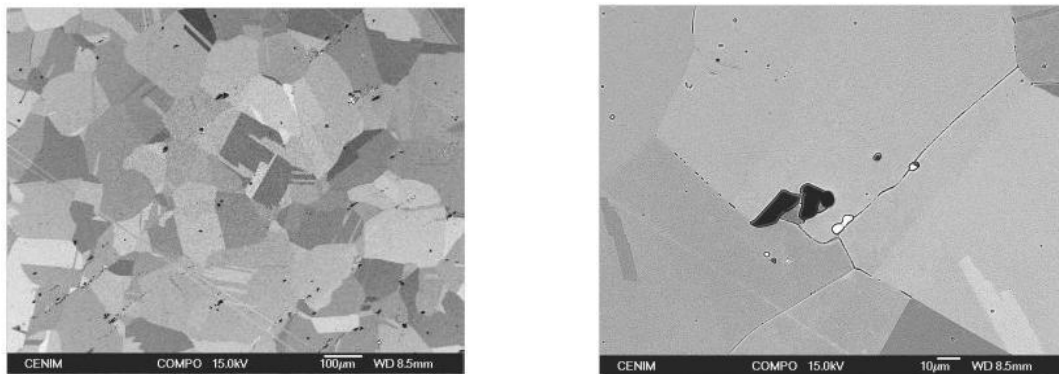




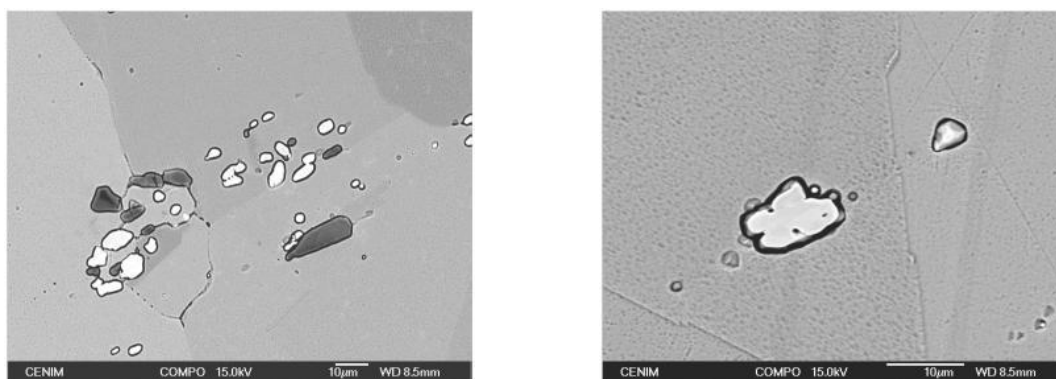
**Figura 71: Microestructura del material base atacada con gliceregía (Microscopía Óptica)**

Las micrografías realizadas por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB o SEM) se muestran en la Figura 72 y Figura 73. En estas micrografías se revela una microestructura de granos equiaxiales con precipitados oscuros y una cantidad menor de precipitados de tonalidad casi blanca.

El análisis por EDS determinó que los precipitados oscuros eran carburos (principalmente de Ti y Mo) y los precipitados blancos boruros (Tabla 22). La formación de boruros puede ser considerada como perjudicial para las propiedades mecánicas del Inconel 901. El boro se añade a este tipo de aleaciones para estabilizar los límites de grano y mejorar la resistencia a la fluencia. El exceso de formación de boruros significa un posible agotamiento de boro en los límites de grano y una disminución de la resistencia a la fluencia.



**Figura 72: Microestructura del material (Microscopía Electrónica de Barrido)**



**Figura 73: Microestructura del material (Microscopía Electrónica de Barrido)**

Partículas	C	Ti	Cr	Fe	Ni	Mo	B	O
Oscura	18,00	59,12	0,99	1,76	2,40	17,73	--	--
Clara	--	14,34	8,59	3,31	51,99	--	13,53	8,27

**Tabla 22: Análisis EDX de las partículas observadas por microscopía electrónica (Figura 73).**

### 5.3.2. Optimización parámetros de soldadura

La velocidad de rotación es un parámetro importante que debe ser ajustado para conseguir un compromiso entre la eficacia de deposición y calidad del material soldado. Con velocidades de avance lentas, el aporte de calor es mayor y es posible mantener el baño fundido con menor intensidad de corriente. Por otra parte, velocidades de avance elevadas requieren mayores intensidades aunque permiten estrechar el perfil de la soldadura y reducir tiempo de soldadura.

Para poder evaluar la velocidad de giro óptima de la mesa del equipo de soldadura orbital se hicieron pruebas a diferentes velocidades. La Figura 74 muestra la sección transversal del conjunto de cuchillas después recrecerlas por soldadura. Las cuchillas se identificaron de la "A" a la "G". A todas ellas, a excepción de la designada como "E", que no se aportó material de aporte, se les realizaron 5 pasadas de material fundido (1 pasada = giro completo de la pieza en la mesa rotatoria). Las velocidades de rotación utilizadas se resumen en la Tabla 23.



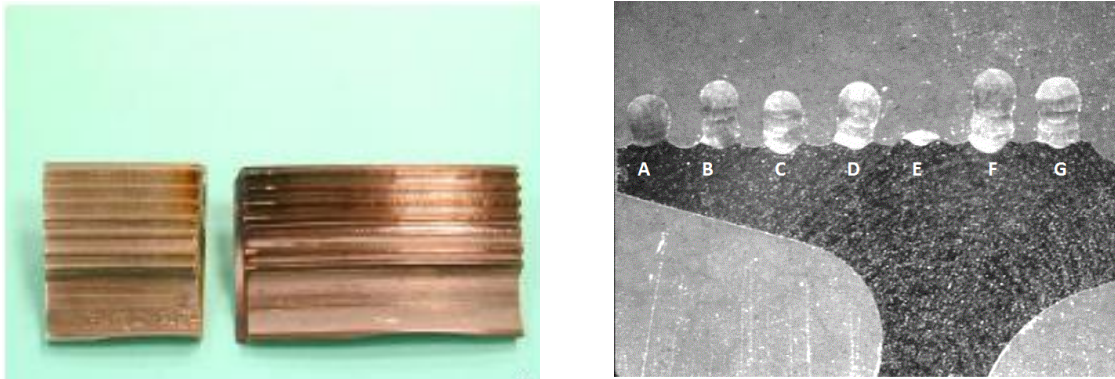


Figura 74: Sección transversal del cierre de cuchillas soldado

Identificación de la cuchilla	Velocidad de rotación (ipm)
A	1
B	2
C	3
D	4
F	5

Tabla 23: Velocidad de rotación de la mesa para las diferentes cuchillas

A mayor velocidad de rotación de la mesa se observa:

- Un cordón depositado más estrecho y alto (Figura 75 y Figura 76)
- Falta de material por mala fusión del metal previamente depositado. (Mostrado con flechas en la Figura 75)
- Un riesgo de contaminación ya que el frente fundido sale antes de la protección del argón.

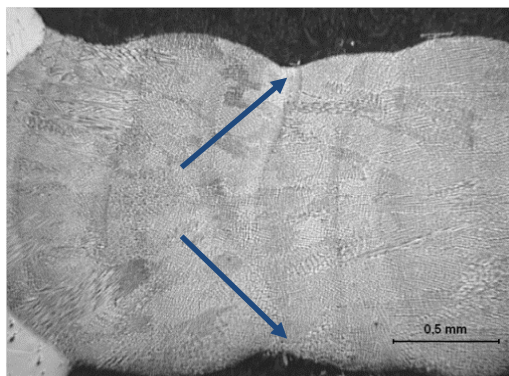


Figura 75: Detalle de la sección transversal del cierre de cuchillas soldado F (5 ipm)

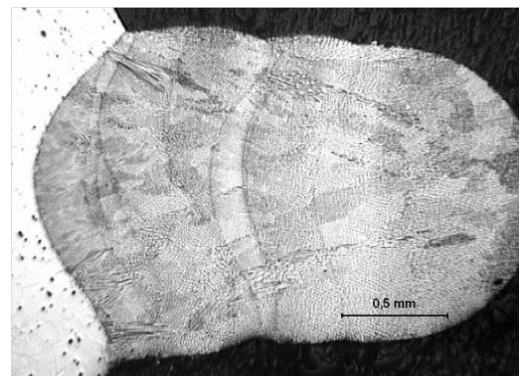


Figura 76: Detalle de la sección transversal del cierre de cuchillas soldado C (3 ipm)

La velocidad óptima de rotación se consideró que era entre la velocidad utilizada para

recrecer la cuchilla "D" y "F" (4.5 ipm). Se consideró que la velocidad óptima era aquella que permitía obtener cordones a la velocidad más elevada sin tener faltas de deposiciones. La cuchilla "G" se recreció a esta velocidad (Figura 74). Los parámetros de soldadura se recogen en el WPS del punto 5.3.9.

### 5.3.3. Microestructura de los cordones de soldadura en bruto.

Existe una gran diferencia entre la microestructura del material de aporte y el material base. El material base mantiene la microestructura de granos equiaxiales, mientras que el cordón de soldadura muestra una estructura en forma dendrítica, como resultado del rápido enfriamiento. No existe una transición gradual entre la estructura dendrítica y la estructura de forjado (Figura 77).

Se realizaron medidas de microdureza Vickers con una carga de 200g a través de una línea recta desde material base hasta la estructura del material depositado (Figura 78). Los resultados demuestran que la dureza del material base no se ve afectada por el proceso de soldadura manteniendo los valores originales entre 403-455  $HV_{0,2}$ . En la ZAT la dureza disminuye hasta valores de 227  $HV_{0,2}$ , mientras que la dureza en el cordón de soldadura tiene valores entre 239 y 265  $HV_{0,2}$ .

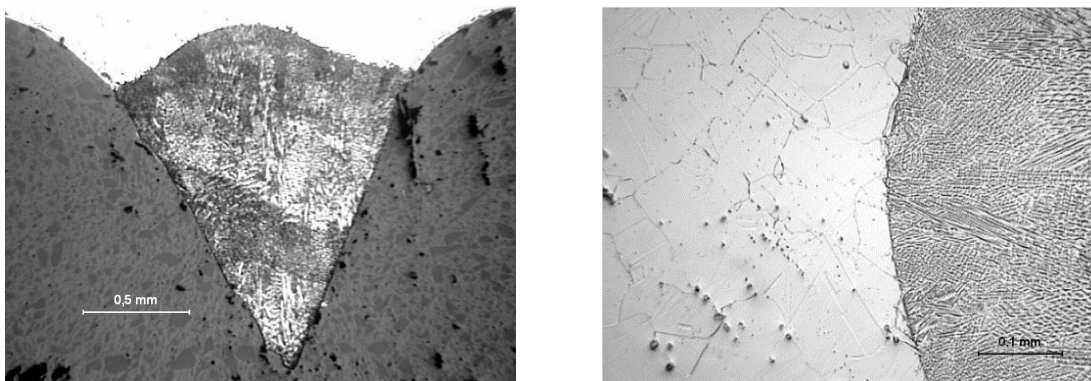


Figura 77: Cordón de soldadura en estado bruto. Se observa una estructura diferenciada entre el metal base (granos equiaxiales) y el material aportado (dendritas)





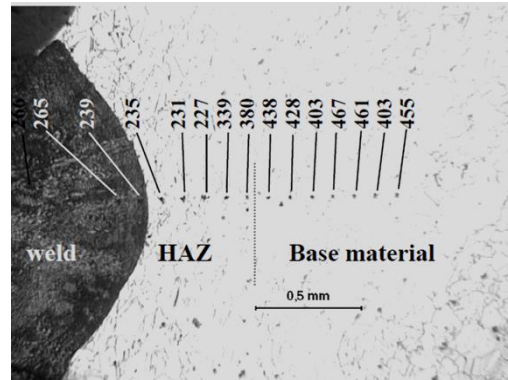


Figura 78: Valores de microdureza Vickers en las tres zonas diferenciadas de la soldadura (material base, HAZ o ZAT y material aportado).

Las micrografías obtenidas por MEB muestran las mismas estructuras que se observan por microscopía óptica. La zona soldada está formada por estructura dendrítica mientras que el material de base por granos equiaxiales (Figura 79).

En la ZAT se observan precipitados. Los resultados de EDS que se realizan a estas partículas muestran que están formadas por carburos de Ti y Mo (Tabla 24).

Partículas	C	Ti	Cr	Fe	Ni	Mo
En la ZAT	20,82	57,37	1,02	1,16	1,90	17,73

Tabla 24: Composición química de los precipitados observados en la ZAT de la Figura 79.

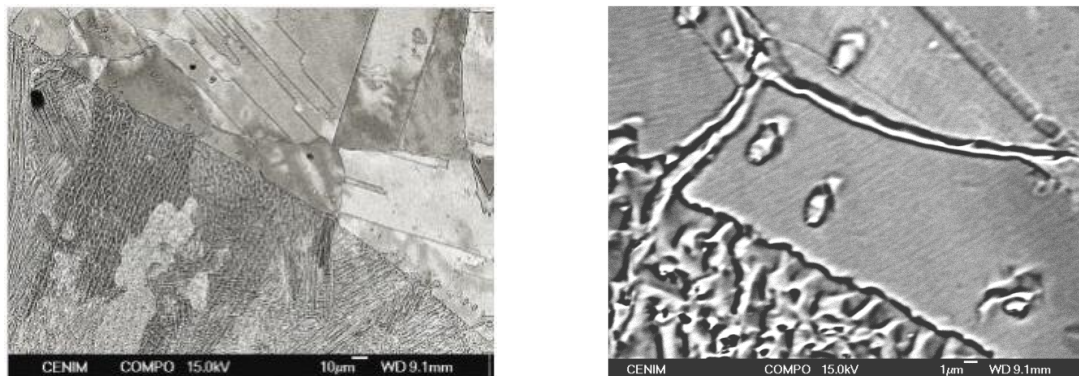
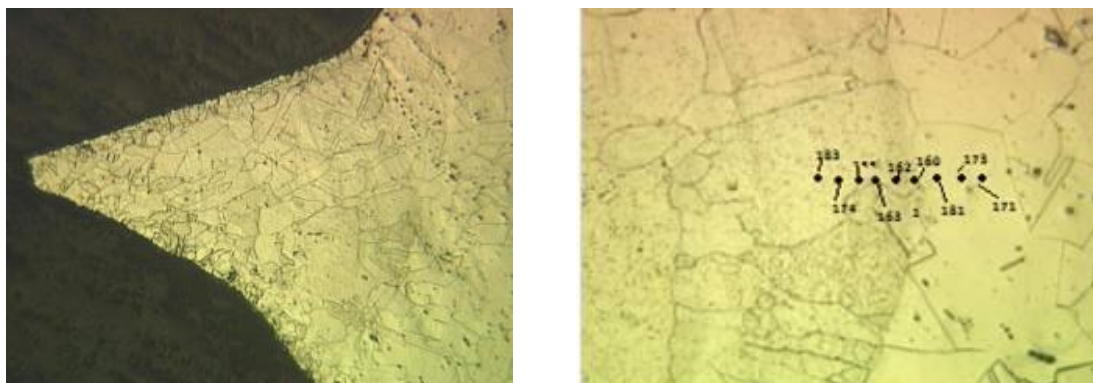


Figura 79: Micrografías MEB de la interfaz material base y soldado.

#### 5.3.4. Microestructura de los cordones de soldadura tras el tratamiento térmico de solubilizado.

Las cuchillas se mecanizaron y caracterizaron después del tratamiento térmico de solubilizado. El resultado más relevante es que el tratamiento térmico de solubilizado elimina la estructura dendrítica del cordón de soldadura y se forman granos de estructura similar al

metal base (Figura 80).



**Figura 80: Cuchillas mecanizadas tras un tratamiento térmico de solubilizado.**

Los valores de microdureza obtenidos en el metal base fueron de 160-181 HV mientras que en el material soldado fueron de 155-183. Estos valores de dureza indican que la fase  $\gamma'$  (principal mecanismo de endurecimiento en el Inconel 901) se ha disuelto en la matriz  $\gamma$ .

Mecanizar el material en estado solubilizado facilitó el proceso. El problema reside que tras el proceso térmico de estabilización y envejecido las dimensiones finales tras el mecanizado varían y quedan fuera de tolerancias. Por este motivo se decidió realizar el mecanizado tras el envejecido de la pieza aunque fuera un proceso más complicado.

### **5.3.5. Microestructura de los cordones de soldadura tras el tratamiento térmico de envejecido.**

Se observan granos similares al del material solubilizado. No se observan defectos, como poros o grietas, ni precipitados en la interfase entre el material de base y el área soldada

El la Figura 81 se observa una cierta continuidad entre los granos del metal base y los del cordón de soldadura. Los granos en el material de base sirven como núcleos para un el crecimiento de los granos en la soldadura. La Figura 82 muestra la cuchilla que no se recreció con material de aporte. En esta zona, también hay formación de granos orientados a la dirección radial.



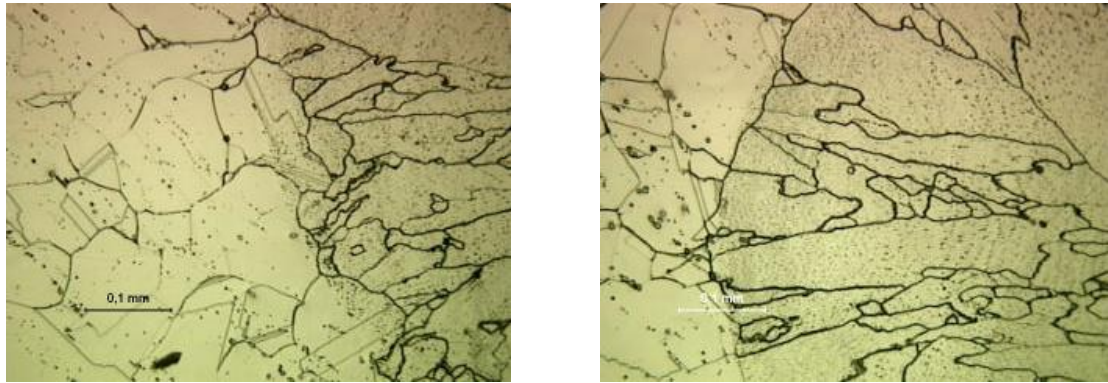


Figura 81: Estructura del metal base y el metal aportado tras el tratamiento de envejecido

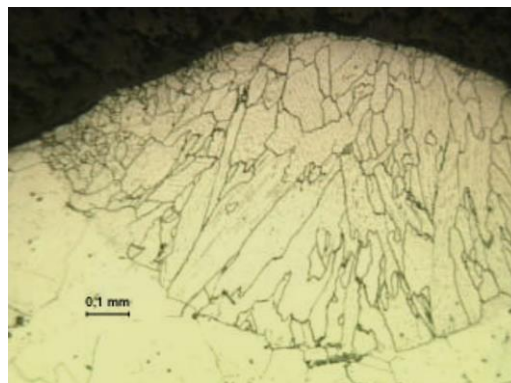


Figura 82: Estructura de la cuchilla E sin aporte de material tras el tratamiento térmico de envejecido.

En la interfaz entre la zona soldada y el material base no se observan precipitados o defectos de otra índole. Se realizaron medidas de microdureza del mismo modo que se realizaron para el metal soldado sin tratamiento térmico y solubilizado. Se obtuvieron valores superiores a  $400\text{HV}_{0.2}$  en todas las zonas lo que indica que las propiedades mecánicas de la ZAT y del cordón de soldadura han sido completamente restauradas y son similares al material de base (Figura 83).

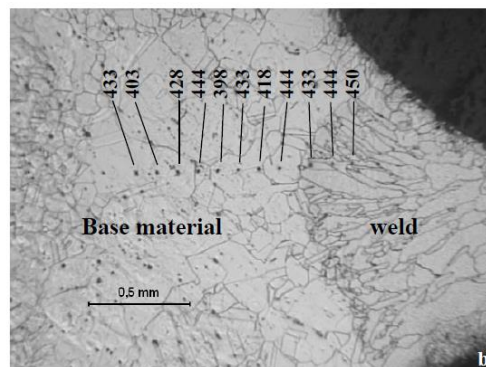
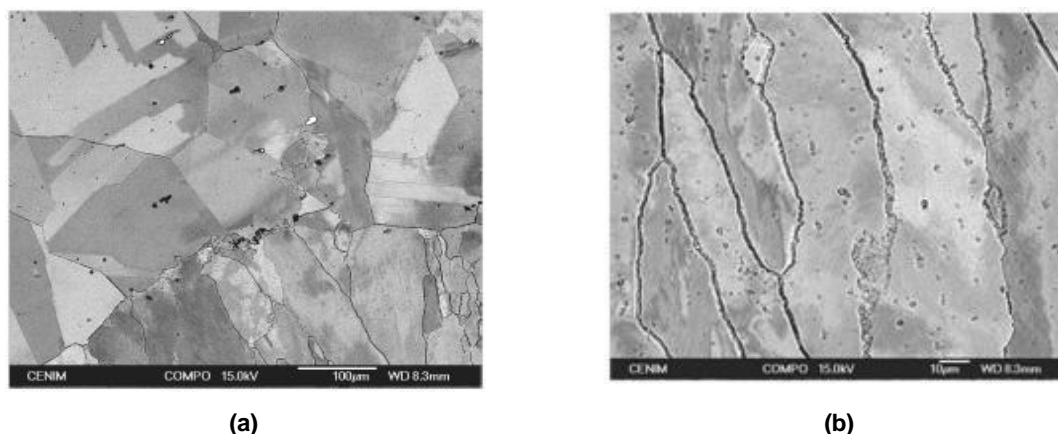


Figura 83: Valores de microdureza Vickers en el material en estado precipitado.

Las micrografías realizadas con MEB confirman una transición entre el metal base y el cordón de soldadura con la ausencia de defectos relevantes (Figura 84). Los carburos precipitados en la ZAT tras soldar el material (véase la Figura 79) no se observan cuando el material se ha sometido a los tratamientos térmicos. Esto indica que el tratamiento térmico de solubilización permite la homogenización del material.



**Figura 84: Micrografías de la ZAT (a) y del cordón de soldadura (b) obtenidas mediante MEB.**

Se observan carburos finamente y homogéneamente distribuidos en los granos formados en la soldadura sin embargo, hay menos cantidad en comparación con el material base. Por lo general, las varillas de material de aporte contienen un bajo contenido de carbono para evitar defectos relacionados con la precipitación incontrolada de carburos. En la Figura 84(b), límites de grano son muy visibles debido a un sobreataque de la muestra durante la preparación metalográfica.

### **5.3.6. Consideraciones sobre el mecanizado.**

Normalmente, es recomendable mecanizar las piezas en estado solubilizado ya que la presión que debe hacer la herramienta es menor. Sin embargo, las aleaciones de níquel-hierro se mecanizan en estado precipitado para evitar distorsiones de la pieza durante tratamientos térmicos posteriores al mecanizado. Esto hace difícil de mecanizar el perfil final y se requiere un cuidado especial durante esta operación.

El Inconel 901, como las aleaciones endurecibles por precipitación, es un difícil de moldear y mecanizar utilizando técnicas tradicionales debido al rápido endurecimiento por deformación en frío. Tras la primera pasada de mecanizado, el endurecimiento por deformación en frío tiende a deformar elásticamente la pieza o la herramienta en las siguientes pasadas. Por



esta razón, los Inconel 901 endurecidos por envejecido son mecanizados lentamente y con una herramienta dura, minimizando el número de pasadas requeridas.

La Figura 85 muestra un ejemplo de mecanizado defectuoso de una cuchilla soldada. Se observa cómo la herramienta elimina un exceso de material debido a una presión excesiva. Un mecanizado erróneo puede incluso llegar a generar grietas como muestra la Figura 85. Para evitar estos fenómenos se recomienda utilizar herramientas afiladas con ángulos de desprendimiento positivos para mecanizar el metal y evitar empujarlo.

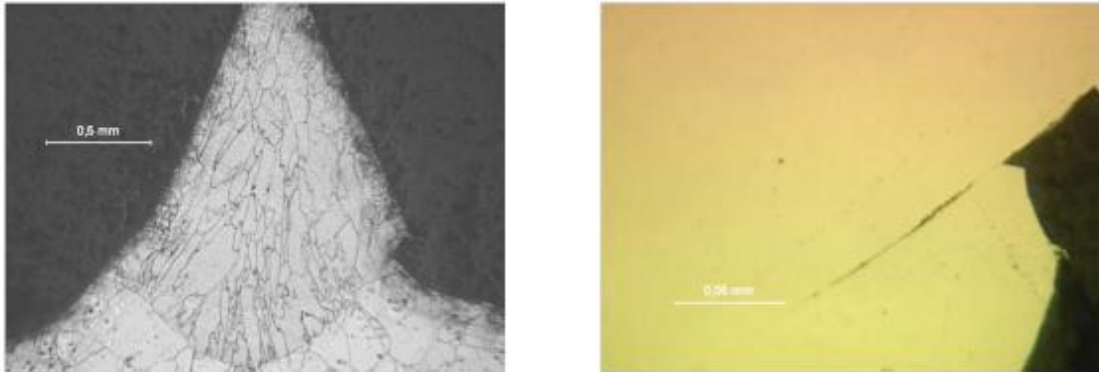


Figura 85: Ejemplo de mecanizado de cuchillas defectuoso

### 5.3.7. Inspección por Líquidos Penetrantes

La inspección por líquidos penetrantes no detectó grietas tras el mecanizado en ninguna de las cuchillas (Figura 86).

**INFORME DE ENSAYO POR LÍQUIDOS PENETRANTES**

INSTALACIÓN, FACILITY:		INFORME N°	██████████
		HOJA N°	1 DE 1
		FECHA:	1-05-2015
MOTOR / MÓDULO: ENG TYPE:		I.T. / E.W.A.:	
CONDICIONES DE ENSAYO		PIEZAS A ENSAYAR	
FAMILIA PENETRANTES: Lavable al agua	TIEMPO PENETRACIÓN: 30 MIN	DENOMINACIÓN: ██████████	
MARCA PRODUCTOS: ARDROX	TIEMPO EMULSIFIC./ELIMINADO: N/A	PIN: ██████████	
REF. PENETRANTE: ARDROX 970 P-25	TIEMPO REVELADO: 15 minutos	S/N: ██████████	
REF. EMULSIF./ELIMINADOR: N/A / SPR5 (spray)	TIEMPO SECADO: N/A	LIMPIEZA: ██████████	
REF. REVELADOR: BD4A (Spray) 	TEMPERATURA SECADO: N/A	EXTENSIÓN ENSAYO: ██████████	
TEMPERATURA DEL ENSAYO: 22° C		INSPECCIÓN CON LUZ BLANCA Y LUPA: sobre pieza >500 lux LUPA: <input checked="" type="checkbox"/> SI (aumento: X18) <input type="checkbox"/> NO	
CABINA INSPECCIÓN: ██████████	LUZ NEGRA >1200 μW/cm²		
<b>RESULTADOS DEL ENSAYO, INDICACIONES OBSERVADAS</b>			
NO CRACKS ( SIN GRIETAS)			
CROQUIS, SITUACIÓN DE INDICACIONES			
NORMA DEL ENSAYO O ESPECIFICACIÓN: ASTM-E-1417-99		PROCEDIMIENTO: ██████████	
LUGAR DEL ENSAYO: SECCIÓN DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	FECHA DEL ENSAYO: OPERADOR: ██████████	SUPERVISADO POR: ██████████	
██████████	NIVEL: NIVEL II	NIVEL: ██████████	
	SELLO OPERADOR: 	FECHA: ██████████	
	1.6-2015	SELLO: ██████████	

Figura 86: Informe de inspección por líquidos penetrantes del cierre de cuchillas.

### 5.3.8. Recubrimiento de las cuchillas por proyección térmica

Tras ser mecanizadas, las cuchillas fueron recubiertas con un recubrimiento de Cr3C2-(Ni20Cr) mediante proyección térmica por plasma atmosférico. En la inspección visual de las cuchillas tras ser recubiertas no se detectaron defectos (Figura 87). La Figura 88 muestra la sección transversal de una cuchilla recubierta con Metco 81VFNS. Se observan espesores de recubrimiento entre 80-100mm.



Figura 87: Aspecto de las cuchillas recubiertas con Metco 81 VFNS

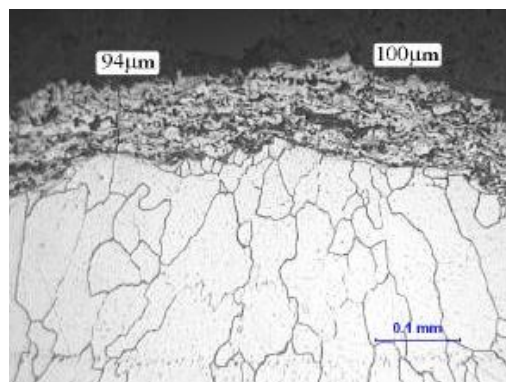


Figura 88: Sección transversal de una cuchilla recubierta con Metco81 VFNS

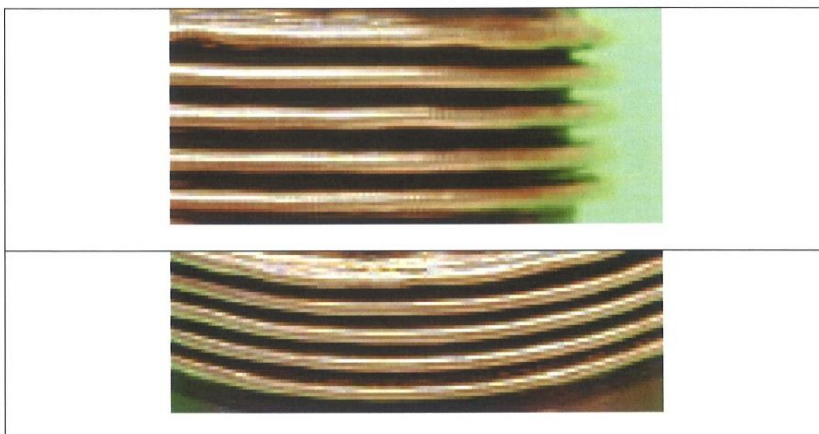




### 5.3.10. WPQR

El WPQR que recoge los resultados de los ensayos realizados a las cuchillas en estado bruto y permite calificar el WPS y al operador de soldadura se muestra en la Figura 90.

REGISTRO DE CUALIFICACIÓN DE PRODECIMIENTO SEGÚN CÓDIGO AWS D17.1:2001 PROCEDURE QUALIFICATION TEST RECORD IN ACCORDANCE WITH AWS D17.1:2001 CODE		
WPQR No: WPQR-XXX-ORB-01 <i>WPQR No.</i>	Soldador <i>Welder</i>	Operador de Soldeo ✓ <i>Welding Operator</i>
Nombre: XXXXXXXXXXXXX <i>Name</i>	N.I.F.: XXXXXXX <i>Id. No.</i>	No trabajador: XXX <i>Welder No.</i>
Especificación de Procedimiento de Soldadura (WPS) No: XXX-ORB-01 <i>Welding Procedure Specification (WPS):</i>	Rev.: 01	Fecha: 09-07-2015 <i>Rev. Date:</i>
Fecha de la Prueba de Cualificación: 06-07-2015 <i>Qualification Test Date</i>		



Ensayos Efectuados Test				
Identif. Cupón de prueba <i>(Test specimen I.D.No.)</i>	Tipo de Ensayo <i>(Type of Test)</i>	No de informe de ensayos <i>(Test report No.)</i>	Resultado del ensayo <i>(Test results)</i>	Observaciones <i>(Remarks)</i>
XXX- Cierre de cuchillas	Visual (VT)	VT-XXX-ORB-01	ACEPTABLE	
	Líquidos Penetrantes (PT)	PT-XXX-ORB-01	ACEPTABLE	
	Metalografía	MET-XXX-ORB-01	ACEPTABLE	

Mireia Gaona Latorre  
AWS Certified Welding Inspector CWI N° 14031491



Figura 90: WPQR para calificar al WPS y al operador de soldadura





### 5.3.11. WPQ

El WPQ se realizó para homologar al operador de soldadura en depositar cordones de soldadura del IIIa y IIIb (materiales base níquel no endurecibles y endurecibles por precipitación). El operador de soldador quedó calificado para recrecer por soldadura áreas de cualquier componente fabricado con superaleaciones base NI.

REGISTRO DE CUALIFICACIÓN DE SOLDADOR SEGÚN CÓDIGO AWS D17.1:2001 WELDER QUALIFICATION TEST RECORD IN ACCORDANCE WITH AWS D17.1:2001 CODE			
Informe No: WPQ-XXX-ORB-01-UXXXXX	Soldador	Operador de Soldeo ✓	
Report No.	Welder	Welding Operator	
Nombre: XXXXXXXXXXXXXXXX	N.I.F.: XXXXXX	No trabajador: XXXXXX	
Name	Id. No.	Welder No.	
Especificación de Procedimiento de Soldadura (WPS) No: XXX-ORB-01 Rev.: 01	Fecha: 06-07-2015		
Welding Procedure Specification (WPS):	Rev.	Date:	
Fecha de la Prueba de Cualificación: 06-07-2015	Qualification Test Date		

	Variables de la Prueba de Cualificación <i>Actual values used in Qualification Test</i>				Rango de Cualificación <i>Qualification Range</i>					
Proceso de Soldeo <i>Welding Process (Table 4.1)</i>	GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)				GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)					
Metal Base / Especificación <i>Base metal / Specification (Table 4.2)</i>	INCONEL 718 Group IIIb				GROUP IIIa and IIIb – Nickel alloys					
Corriente / Polaridad <i>Current / Polarity (Table 4.4)</i>	Alterna <i>AC</i>				Alterna <i>AC</i>					
	CEN <i>DCEP</i>	✓			CEN <i>DCEP</i>	✓				
	CCEP <i>DCEP</i>				CCEP <i>DCEP</i>					
Progresión de la Soldadura <i>Weld Progression</i>	No aplica <i>N/A</i>	✓			No aplica <i>N/A</i>	✓				
	Ascendente <i>Up</i>				Ascendente <i>Up</i>					
	Descendente <i>Down</i>				Descendente <i>Down</i>					
Soldeo Por un lado/Ambos lados <i>Single Weld / Double Weld</i>	Soldeo Por un lado <i>Single Weld</i>	✓			Soldeo Por un lado <i>Single Weld</i>	✓				
	Ambos Lados <i>Double Weld</i>				Ambos Lados <i>Double Weld</i>					
Respaldo <i>Backing</i>	SI <i>Yes</i>				SI <i>Yes</i>	✓				
	NO <i>No</i>	✓			NO <i>No</i>	✓				
Penetración: <i>Penetration</i>	Parcial <i>Partial</i>				Parcial <i>Partial</i>					
	Completa <i>Full</i>	N/A			Completa <i>Full</i>	N/A				
Posición / Tipo unión y producto <i>Position / Join and product type</i>										
	Chapa a tope: <i>Sheet Groove</i>	1G	2G	3G	4G	Chapa a tope: <i>Sheet Groove</i>	1G	2G	3G	4G
		1F	2F	3F	4F		1F	2F	3F	4F
	Chapa en ángulo: <i>Sheet Fillet</i>					Chapa en ángulo: <i>Sheet Fillet</i>				
		1G	2G	3G	4G		1G	2G	3G	4G
	Tubo a tope: <i>Tube Groove</i>					Tubo a tope: <i>Tube Groove</i>				
	1F	2F	3F	4F		1F	2F	3F	4F	
Tubo en ángulo: <i>Tube Fillet</i>					Tubo en ángulo: <i>Tube Fillet</i>					
Espesores / Diameters <i>Thickness / Diameters</i>	Deposición de material				Deposición de material					

Ensayos Efectuados Test				
Identif. Cupón de prueba <i>(Test specimen I.D.No.)</i>	Tipo de Ensayo <i>(Type of Test)</i>	No de informe de ensayos <i>(Test report No.)</i>	Resultado del ensayo <i>(Test results)</i>	Observaciones <i>(Remarks)</i>
XXX- Cierre de cuchillas	Visual (VT)	VT-XXX-ORB-01	ACEPTABLE	PQR – XXX-ORB-01
	Líquidos Penetrantes (PT)	PT-XXX-ORB-01	ACEPTABLE	PQR – XXX-ORB-01
	Metalografía	MET-XXX-ORB-01	ACEPTABLE	PQR – XXX-ORB-01

FECHA DE RESULTADOS DE LA PRUEBA <i>Certification date</i> 10/07/2015	VÁLIDEZ: INDEFINIDA CON REGISTROS SEMESTRALES <i>Validity: Indefinitely provided an auditable records every 6 months.</i>
---	--

La persona mencionada en el anverso de este documento está cualificada de acuerdo con código AWS D17.1:2001 dentro de los límites de soldeo anteriormente especificados según el proceso de soldadura utilizado en este prueba de soldeo. *The above named individual is qualified in accordance with code AWS D17.1:2001 within the above limits for the welding process used for this test weld.*



Mireia Gaona Latorre

AWS Certified Welding Inspector CWI N° 14031491

**OBSERVACIONES:**  
Solo valido para soldadura en reparaciones de piezas, no para fabricación o correcciones de piezas de fabricación.  
*Only for weld repair applications. Not for fabrication. Not for corrections encountered during original manufacturing.*

MANTENIMIENTO DE LA CUALIFICACIÓN POR EL RESPONSABLE / COORDINADOR DEL SOLDADOR DE LA EMPRESA CONREGISTROS DOCUMENTALES CADA 6 MESES.  
*EXTENDED VALIDITY OF THE QUALIFICATION BY EMPLOYER / WELDING COORDINATOR EVERY 6 MONTHSWITH RECORDS.*

<p>Antes de / Before 06/01/2016</p> <p><b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo:</b> <i>Position</i></p>	<p>Antes de / Before 06/01/2018</p> <p><b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo:</b> <i>Position</i></p>
<p>Antes de / Before 06/07/2016</p> <p><b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo:</b> <i>Position</i></p>	<p>Antes de / Before 06/07/2018</p> <p><b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo:</b> <i>Position</i></p>
<p>Antes de / Before 06/01/2017</p> <p><b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo:</b> <i>Position</i></p>	<p>Antes de / Before 06/01/2019</p> <p><b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo:</b> <i>Position</i></p>
<p>Antes de / Before 06/07/2017</p> <p><b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo:</b> <i>Position</i></p>	<p>Antes de / Before 06/07/2019</p> <p><b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo:</b> <i>Position</i></p>

Figura 91: WPQ que califica al operador de soldadura para depositar cordones de soldadura del grupo III.



## 6. Estudio económico

### 6.1. Costes en la calificación de soldadores

El objetivo de este presupuesto es mostrar la inversión necesaria para la calificación de un soldador. Los costes se han clasificado en directos e indirectos según la estructura de la organización.

#### COSTES DIRECTOS

Material Base	Cantidad	Unidad	Precio unitario €/un	Importe
Chapa AMS5560	1	Chapa	710,00	710,00 €
Chapa AMS5596	1	Chapa	1450,23	1.450,23 €
Chapa AMS4031	1	Chapa	1225,00	1.225,00 €
Chapa AMS4418	1	Chapa	1704,50	1.704,50 €
Chapa AMS4907	1	Chapa	2100,37	2.100,37 €
Chapa AMS5801	1	Chapa	4213,75	4.213,75 €
				<b>11.403,85 €</b>

Material de aporte	Cantidad	Unidad	Precio unitario €/un	Importe
Varilla AMS5680	1	kg	144,68	144,68 €
Varilla AMS 5832	1	kg	158,00	158,00 €
Varilla AMS4191	1	lb	94,53	94,53 €
Varilla AMS 4396	1	lb	94,09	94,09 €
Varilla AMS4956D	1	lb	103,24	103,24 €
Varilla AMS 5801E	1	kg	189,30	189,30 €
				<b>783,84 €</b>

Electrodos	Cantidad	Unidad	Precio unitario €/un	Importe
EWP	10	unidad	1,90	19,00 €
EWCe-2	10	unidad	2,36	23,60 €
				<b>42,60 €</b>

Material fabricación utillaje	Cantidad	Unidad	Precio unitario €/un	Importe
Acero F127 (pletina 300x20mm)	1	m	64,89	64,89 €
Cobre (chapa 1,0x300x600 mm)	1	unidad	51,26	51,26 €
Tornillería	10	unidad	2,05	20,50 €
				<b>136,65 €</b>

<b>Coste área máquinas</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario €/un</b>	<b>Importe</b>
Fabricación utillaje	32	horas	74,00*	2.368,00 €
				<b>2.368,00 €</b>

<b>Coste área chapistería</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario €/un</b>	<b>Importe</b>
Preparación probetas	2	horas	74,00*	148,00 €
				<b>148,00 €</b>

<b>Coste área soldadura</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario €/un</b>	<b>Importe</b>
Proceso soldadura	24	horas	74,00*	1.776,00 €
				<b>1.776,00 €</b>

<b>Coste área END</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario €/un</b>	<b>Importe</b>
PT	18	horas	74,00*	1.332,00 €
RX	27	horas	74,00*	1.998,00 €
				<b>3.330,00 €</b>

<b>Coste laboratorio</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario €/un</b>	<b>Importe</b>
Metalografía	12	horas	63,00*	756,00 €
				<b>756,00 €</b>

---

**TOTAL COSTES DIRECTOS** **20.744,94 €**

(\*) En el precio unitario hora/máquina se tienen en cuenta los overheads, costes de estructura, calidad y material consumible como: argón, herramientas, líquidos, resinas, etc. No se tienen en cuenta el material base a soldar, varillas, electrodos y material para la fabricación del útil.

#### COSTES INDIRECTOS

<b>Ingeniería</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario €/un</b>	<b>Importe</b>
Diseño utillaje	24	horas	95,00*	2.280,00 €
Validación utillaje	6	horas	95,00*	570,00 €
Realización WPS, WPQR Y WPQ	24	horas	95,00*	2.280,00 €
Inspección Visual	18	horas	95,00*	1.710,00 €
Certificación CWI	6	horas	95,00*	570,00 €
				<b>7.410,00 €</b>

(\*) En el precio unitario se tienen en cuenta los overheads y costes de estructura.



El coste total para la calificación de un soldador según la AWS D17.1 en 6 grupos de materiales es de **28.154,94 €**

### Costes por soldador adicional:

#### COSTES DIRECTOS

<b>Coste área chapistería</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario €/un</b>	<b>Importe</b>
Preparación probetas	2	horas	74,00	148,00 €
				<b>148,00 €</b>
<b>Coste área soldadura</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario €/un</b>	<b>Importe</b>
Proceso soldadura	24	horas	74,00	1.776,00 €
				<b>1.776,00 €</b>
<b>Coste área END</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario €/un</b>	<b>Importe</b>
PT	18	horas	74,00	1.332,00 €
RX	27	horas	74,00	1.998,00 €
				<b>3.330,00 €</b>
<b>Coste laboratorio</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario €/un</b>	<b>Importe</b>
Metalografía	12	horas	63,00	756,00 €
				<b>756,00 €</b>
<b>TOTAL COSTES DIRECTOS</b>				<b>6.010,00 €</b>

#### COSTES INDIRECTOS

<b>Ingeniería</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario €/un</b>	<b>Importe</b>
Realización WPQR Y WPQ	20	horas	95,00	1.900,00 €
Inspección Visual	18	horas	95,00	1.710,00 €
Certificación CWI	6	horas	95,00	570,00 €
<b>TOTAL COSTES INDIRECTOS</b>				<b>4.180,00 €</b>

**COSTES TOTAL POR SOLDADOR CALIFICADO ADICIONAL 10.190,00 €**

Los costes asociados a la calificación de nuevos soldadores en los mismos 6 grupos de materiales es de 10190€.

## 6.2. Viabilidad económica de la reparación del cierre de cuchillas.

Antes de realizar la solicitud de reparación al fabricante y la sustentación del proceso, se realizó un estudio de la viabilidad económica para comprobar si el proceso de reparación propuesto es más económico que el precio una pieza nueva. Una reparación se considera antieconómica cuando resulta más barato montar una pieza nueva en el motor que repararla.

La instrucción de reparación propuesta se basa principalmente en recrear las cuchillas mediante soldadura TIG, mecanizar las cuchillas a contorno original y recubrirlas con Cr3C2-(Ni 20Cr) tal y como indica el plano de fabricación. El proceso de reparación se describió en detalle en el punto 5.2.1. En base a estos procesos se realizó un Plan de negocio (Business Case) y se confirmó que la reparación es rentable.

El proceso de reparación lleva asociado unos costes asociados a la sustentación del proceso (validación). Estos costes se pueden dividir en costes directos de operaciones de taller e indirectos de horas de ingeniería (Tabla 25). Dentro de las horas de ingeniería están los costes de realizar procedimientos, pautas, WPS, calificación de soldadores y homologación de recubrimientos. El coste de la validación de esta propuesta de reparación está estimado en 36.000€.

Tecnologías		Costes de Validación			
Proceso	Número de operaciones	Ingeniería (h)	Taller (h)	Desarrollo de la tecnología	Validación con piezas no servicable
Chorro	1	4	6	500,00 €	0
Limpieza química	1	8	16	1.200,00 €	Y
Proyección Térmica	1	24	12	2.800,00 €	Y
Inspección Líquidos Penetrantes	14	28	70	4.900,00 €	0
Soldadura Orbital	7	112	70	9.800,00 €	Y
Mecanizado (Torno)	14	112	84	16.800,00 €	0
<b>TOTAL</b>		<b>288,00</b>	<b>258,00</b>	<b>36.000,00 €</b>	

Tabla 25: Costes asociados a la validación del proceso.

El coste de los diferentes procesos se calculó en base a los datos previos de la organización. El coste medio de la reparación (una vez validada) está en torno a los 3111,70€ (Tabla 26), mientras que el coste de una pieza nueva es de 60.633€.

Procesos	Número de operaciones	Piezas de repuesto	Coste del proceso
Chorro	1	No	60,88 €
Limpieza química	1	No	121,43 €
Proyección Térmica	1	No	188,62 €
Inspección Líquidos Penetrantes	14	No	710,21 €
Soldadura Orbital	7	No	710,21 €
Mecanizado (Torno)	14	No	1.320,34 €
<b>TOTAL</b>			<b>3.111,70 €</b>

Tabla 26: Estimación del coste del proceso de reparación una vez haya estado validado.

Se evaluó también el beneficio que el cliente podría tener si se reparaba la pieza en vez de



substituirlos por una nueva. Para ello se baso en las siguientes asunciones (Figura 92):

- En la actualidad, al no existir una instrucción de reparación para recrecer las cuchillas, el 88% de los cierres de cuchillas de HPT son reemplazados.
- Una vez la reparación sea validada por el fabricante el 80% de las piezas podrán ser reparadas y un 8% se substituirán ya que los daños que presentan no pueden ser reparados mediante esta instrucción de reaparición.
- Durante el proceso de reparación pueden haber complicaciones que hagan que la pieza no sea servicable (errores en el mecanizado, en el proceso de soldadura, etc..) Se prevé que la reparación se realicé con éxito en el 97% de las piezas.



Figura 92: Asunciones para realizar en plan de negocio.

Los costes y precios de la reparación actualmente y en el futuro se muestran en la Figura 93. Actualmente el coste de una pieza nueva es de 60.653€ y se vende al cliente con una margen de un 4% (63.123€). Para una misma cantidad de margen de beneficio neto, este aumenta de un 4% al 93% si la pieza se repara.

Costes y Precios de las piezas y de la reparación			
← Actual →	Pieza nueva (Coste)	60.653,00 €	
	Coste del proceso de reparación	- €	
	Ratio Reparación/Substitución	0,00%	
	Margen		
	Pieza nueva (Precio Venta)	63.123,00 €	4%
	Precio de la pieza reparada	- €	#¡DIV/0!
← Futuro →	Pieza nueva (Coste)	60.653,00 €	
	Coste del proceso de reparación	3.111,70 €	
	Ratio Reparación/Substitución	5,13%	
	Margen		
	Pieza nueva (Precio Venta)	63.123,00 €	4%
	Precio de la pieza reparada	6.015,00 €	93%
	Ratio Reparación/substitución	9,53%	

Figura 93: Costes y precios de la pieza y de la reparación.

El ahorro para el cliente final es considerable. Los costes por visita Overhaul (OH) del motor en la actualidad y una vez aprobada la reparación se muestran en la Figura 94. El motor lleva 3 cierres de cuchilla que se suelen cambiar en cada visita OH. Esto significa que el reemplazo de estas piezas le representa al cliente un coste total de 160.123,92€/motor OH. Si los tres cierres se repararan el coste sería de 26.391,82€. Esto significa un ahorro de costes para el cliente final de 106.985,68€/OH.

<b>Costes - Actuales</b>	<b>160.123,92 €</b>
Reemplazo de la pieza por una nueva	160.123,92 €
Costes por reparación	- €
Costes causado por piezas que se han dañado durante el proceso de reparación (scrap yield Repair)	- €
<b>Costes - Futuro</b>	<b>26.391,82 €</b>
Reemplazo de la pieza por una nueva	14.556,72 €
Costes por reparación	7.468,08 €
Costes causado por piezas que se han dañado durante el proceso de reparación (scrap yield Repair)	4.367,02 €
<b>Costes - TOTAL</b>	<b>- 106.985,68 €</b>
Reemplazo de la pieza por una nueva	-116.453,76 €
Costes por reparación	5.974,46 €
Costes causado por piezas que se han dañado durante el proceso de reparación (scrap yield Repair)	3.493,61 €

Figura 94: Costes por visita de OH del motor cuando los tres cierres de cuchillas de la HPT están dañados.





## 7. Impacto ambiental

El impacto ambiental es el efecto que produce la actividad humana sobre el medio ambiente. Las buenas prácticas medioambientales son una serie de recomendaciones para minimizar la generación de impactos sobre el entorno. La aplicación de estas trata de controlar la contaminación atmosférica, acústica, vertidos, generación de residuos, consumo de recursos y todas las posibles afecciones provocadas por la actividad empresarial sobre el medio ambiente

En el desarrollo de los procesos de soldadura TIG se contribuye a distintos problemas ambientales:

**a) Agotamiento de recursos**

- Utilización de energía eléctrica
- Desperdicio de materiales.

**b) Contaminación de la atmósfera**

- Debido a los humos y gases desprendidos durante el proceso.

**c) Contaminación del agua**

- Con las partículas metálicas de los humos que llegan al agua.
- Con las aguas residuales de las instalaciones.

**d) Residuos**

- No cambiando los filtros de los sistemas de extracción con la frecuencia necesaria para que cumplan su función.
- No separando los distintos residuos según sus requisitos de gestión.

Los recursos que utiliza el soldador y los desechos que generan estas operaciones se resumen a continuación.

**A. Recursos que utiliza el soldador (soldadura TIG)**

a) Instalaciones:

- Iluminación natural o artificial.
- Ventilación normal con extracción forzada de humos.
- Instalación eléctrica.
- Instalación aire comprimido.
- Instalación argón.
- Cabinas aisladas con aspiración de humos.
- Almacén.

b) Equipo y maquinaria:

- Esmeriladoras fijas para afilar electrodos.
  - Equipo de soldadura TIG.
  - Equipo de soldadura TIG orbital.
  - Mesas de soldadura.
  - Taburetes regulables.
  - Mesas para corte de materiales metálicos.
  - Armarios para herramientas.
- c) Herramientas y utillaje:
- Porta-electrodos.
  - Utillaje.
  - Cepillos de púas de acero.
  - Lijas.
- d) Material de consumo:
- Varillas de soldadura.
  - Electrodos no consumibles EWP y EWCe-2.
  - Argón.
  - Chapas de diferentes materiales.
- e) Elementos de protección
- Botas de protección.
  - Gafas para esmerilar.
  - Guantes.
  - Polainas.
  - Chaqueta y pantalón ignífugos.
  - Manguitos.
  - Pantalla soldadura.
  - Orejeras para el ruido.
  - Máscara para partículas.

## **B. Desechos que genera la soldadura TIG**

- a) Asimilables a residuos urbanos:
- Restos de papel y cartón, latas, botellas de vidrio, plásticos, trapos y ropa.
  - Estos residuos son objeto de recogida domiciliaria por lo que se depositarán en los contenedores correspondientes.
- b) Residuos industriales inertes:
- Restos de metales, restos de varillas, virutas metálicas, herramientas viejas, cristales de gafas, pantallas protectoras, etc.
  - Empresas especializadas se encargan de la recogida la llevan a cabo y se ocupan de dar un nuevo uso a estos residuos.
- c) Residuos peligrosos:
- Partículas y polvos metálicos, filtros de campanas de extracción, fluorescentes, pilas, restos de electrodos.
  - La recogida de este tipo de residuos ha de hacerla una empresa autorizada para su gestión.



- Los residuos deben estar correctamente almacenados y separados.
- Los contenedores de residuos peligrosos se han de situar en zonas bien ventiladas a cubierto del sol y la lluvia, lejos de fuentes de calor y que, en caso de accidente, las consecuencias sean mínimas

d) Emisiones a la atmósfera:

- Humos metálicos y ruido.
- Disponer de un libro de emisiones donde se registran los resultados de los controles periódicos.
- Disponer de un libro de mantenimiento donde deben constar las operaciones de mantenimiento realizadas en las instalaciones.
- Utilizar filtros para evitar emisiones innecesariamente contaminantes
- Reducir emisiones acústicas con maquinaria y herramientas menos ruidosas. Mantener los equipos desconectados cuando no se estén utilizando.



## 8. Conclusiones

- Es imprescindible que los soldadores y operadores de soldadura, que trabajan en un centro de mantenimiento MRO, estén calificados por algún organismo. En aeronáutica el organismo calificador más común en los procesos de soldadura es la AWS.
- El código AWS D17.1 establece los requisitos generales de soldadura de fusión en aplicaciones aeroespaciales. En el código se recogen los requisitos para el diseño soldadura, el personal y el procedimiento de calificación, la inspección y los criterios de aceptación.
- Los soldadores y operadores se deben calificar a partir de un WPS (Especificación de un Procedimiento de Soldadura). En el WPS deben recogerse las variables esenciales y no esenciales del proceso de soldadura.
- El soldador se calificó en base a un WPQR mediante ensayos no destructivos (inspección visual, líquidos penetrantes y radiografía industrial), bajo los criterios de aceptación y rechazo del código AWS D17.1.
- Una soldadura de ensayo realizada en un metal base incluido en uno de los grupos de materiales de la AWS D17.1 certifica únicamente ese grupo de materiales.
- A pesar de utilizar el mismo proceso de soldadura (TIG manual) las variables esenciales de soldadura varían de un material a otro.
- El proceso de soldadura TIG orbital por arco pulsado es un procedimiento adecuado para recuperar los perfiles de las cuchillas de cierres de HPT.
- Cada paso del proceso de reparación del cierre de cuchillas es crítico, incluyendo el mecanizado previo de las cuchillas, la soldadura TIG, los tratamientos térmicos, el mecanizado final y el recubrimiento de las cuchillas mediante proyección térmica.
- El mecanizado final es un punto crítico del proceso ya que las cargas y los parámetros óptimos se debe ajustar cuidadosamente.
- Reparar las piezas permite un ahorro de costes significativo para las organizaciones de mantenimiento y para los clientes.



## 9. Bibliografía

### 9.1. Referencias bibliográficas.

- [1] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jet\\_engine\\_spanish.svg?uselang=es](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jet_engine_spanish.svg?uselang=es)
- [2] <http://mechanical-engg.com/forum/blogs/entry/495-how-does-turbojet-turbofan-turboprop-and-a-turboshaft-works-what-is-the-difference-between-them/>
- [3] <http://concordeailletteshp-en15.blogspot.com.es/>
- [4] GOGIA, A.K. High Temperature Titanium Alloys, Defence Science Journal, Vol.55, No.2, April 2005, pp149-173. ISSN 0011748X
- [5] BAYER, R.R. An Overview on the Use of Titanium in the Aerospace Industry, Materials Science and Engineering A, Vol.A213, 1996, pp103-114. ISSN 0921-5093.
- [6] SCHILKE, P.W. Advanced Gas Turbine Materials and Coatings, 2004.
- [7] COUTSOURADIS, D.; DAVIN, A. & LAMBERIGTS, M. Cobalt-based Superalloys for Application in Gas Turbines, Materials Science and Engineering, Vol.88, 1987 pp11-19, ISSN 0921-5093
- [8] COUTSOURADIS, D.; DAVIN, A. & LAMBERIGTS, M. Cobalt-based Superalloys for Application in Gas Turbines, Materials Science and Engineering, Vol.88, 1987, pp11-19, ISSN 0921-5093
- [9] Advances in Gas Turbine Technology. Edited by Ernesto Benini, ISBN 978-953-307-611-9, , Publisher: InTech, Chapters published.
- [10] AWS Welding -2.9: Welding Handbook, Volume 2 Part 1 - Welding Processes.
- [11] AWS D17.1/D17.1M:2010 AMD1 Specification for fusion welding for aerospace applications
- [12] AMS5660J, Nickel-Iron Alloy, Corrosion and Heat-Resistant, Bars and Forgings 12.5Cr - 42.5Ni -6.0Mo - 2.7Ti - 0.015B - 34Fe Consumable Electrode or Vacuum Induction Melted Solution, Stabilization, and Precipitation Heat Treated.
- [13] AMS5661G, Nickel-Iron Alloy, Corrosion and Heat-Resistant, Bars and Forgings, and rings 42.5Ni - 12.5Cr - 5.8Mo - 2.9Ti - 0.015B - 35Fe Consumable Electrode or Vacuum Induction Melted Solution, Stabilization, and Precipitation Heat Treated.

[14] ASM Specialty Handbook. Nickel, Cobalt, and Their Alloys. ASM International

## 9.2. Bibliografía complementaria.

[15] Aerospace Structural Metals Handbook, Vol. II, Non Ferrous Alloys, Syracuse University Press, 1963.

[16] J. BYRNE, N.Y.K. KAN. Influence of sub-surface defects on low-cycle fatigue life in a gas turbine disc alloy at elevated temperature. Int. Journal of Fatigue, Vol. 21, 1999, pp. 195-206.

[17] T. H. HYDE, L. XIA, A. A. BECKER. Prediction of creep failure in aeroengine materials under multi-axial stress states, 1996, Int. J. Mech, Vol. 38, No. 4, pp. 385-403.

[18] F. TANCRET, T. SOURMA. Design of a creep resistant nickel base superalloy for power plant applications. Part 3 –Experimental Results, Materials Science and Technology, Vol. 19, March 2003, pp. 296-302.

[19] M. QIAN, J.C. LIPPOLDA. The effect of annealing twin-generated special grain boundaries on HAZ liquation cracking of nickel-base superalloys, Acta materialia, 51, 2003, pp. 3351-3361.

[20] J. W. LEE. Repair of Rotating Air-Sealing components for gas turbine engines, Welding Research Supplement, November 1975, pp. 409-415.

[21] H.J. PENKALLA, J. WOSIK, A. CZYRSKA-FILEMONOWICZ. Quantitative microstructural characterisation of Ni-base superalloys, 2003, Materials Chemistry and Physics, 81, pp. 417-423.

[22] A. GREGORI. A survey of welding and repairing of nickel superalloys for gas turbines. The Welding Institute Report No. 774/2003.

[23] C.T. SIMS, N.S. STOLOFF, W.C. HAGEL. Superalloys, (Edit.) A Wiley-Interscience Publication, 1987, ISBN 0-471-01147-9

[24] TIEN, J.K., CAULFIELD, T. SAN DIEGO. Superalloys, supercomposites and superceramics, CA (US); Academic Press, Inc., 1989, ISBN 0-12-690845-1

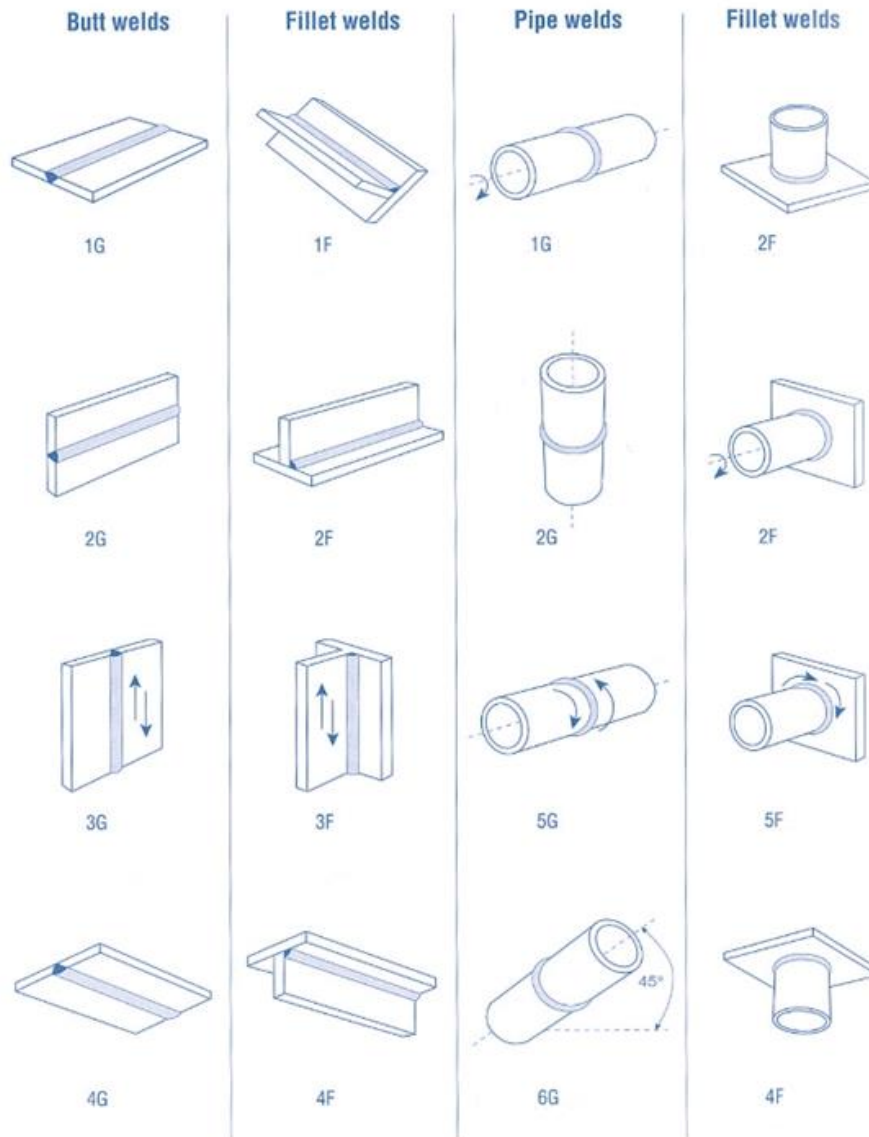
[25] DONAICHE, T. Superalloys, ASM Intl., 2002, ISBN 0-87170-749-7





## 10. ANEXOS

### ANEXO A: Posición de soldadura.



#### Soldadura a tope en chapa

1 G POSICIÓN PLANA. La posición de soldadura empleada para soldar desde el lado superior de la unión; el anverso de la soldadura se encuentra aproximadamente horizontal.

2G POSICION HORIZONTAL. La posición en la que la soldadura se realiza sobre el

lado superior de una superficie aproximadamente horizontal y contra una superficie aproximadamente vertical.

3G POSICION VERTICAL. La posición de soldadura en la que el eje de la soldadura se encuentra aproximadamente vertical.

4G POSICION BAJO TECHO. La posición en la que la soldadura se realiza desde el lado inferior de la unión.

### **Soldadura en ángulo en chapa**

1F POSICIÓN PLANA. La posición de soldadura empleada para soldar desde el lado superior de la unión; el anverso de la soldadura se encuentra aproximadamente horizontal.

2F POSICION HORIZONTAL. La posición en la que la soldadura se realiza sobre el lado superior de una superficie aproximadamente horizontal y contra una superficie aproximadamente vertical.

3F POSICION VERTICAL. La posición de soldadura en la que el eje de la soldadura se encuentra aproximadamente vertical.

4F POSICION BAJO TECHO. La posición en la que la soldadura se realiza desde el lado inferior de la unión

### **Soldadura en ángulo en tubo**

1G POSICION HORIZONTAL CON GIRO. La posición de una unión de tubo en la que el eje del tubo se encuentra aproximadamente horizontal, y la soldadura se realiza en posición plana haciendo girar el tubo.

2G POSICION VERTICAL. La posición de una unión de tubo en la que la soldadura se realiza en posición horizontal y el tubo no hace girar durante el soldeo.

5G POSICION HORIZONTAL DE TUBO. La posición de una unión de tubo en la que el eje del tubo se encuentra aproximadamente horizontal y el tubo no se gira durante el soldeo.

6G POSICION INCLINADA. La posición de una unión de tubo en la que el eje dei tubo se encuentra a un ángulo de aproximadamente 45° de la horizontal, y el tubo no se gira durante el soldeo.

### **Soldadura a tope en tubo**



1 F POSICIÓN PLANA. La posición de soldadura empleada para soldar desde el lado superior de la unión; el anverso de la soldadura se encuentra aproximadamente horizontal y el tubo se hace girar durante el soldeo.

2F POSICION HORIZONTAL. La posición en la que la soldadura se realiza sobre el lado superior de una superficie aproximadamente horizontal y contra una superficie aproximadamente vertical, sin girar el tubo durante el soldeo.

4F POSICION BAJO TECHO. La posición en la que la soldadura se realiza desde el lado inferior de la unión, sin girar el tubo durante el soldeo.

5F POSICION MULTIPLE. La posición en la que el eje del tubo se encuentra aproximadamente horizontal y el tubo no se gira durante el soldeo.



## ANEXO B: Posiciones en las que el soldador está calificado según la soldadura de ensayo que realice.

SOLDADURA ENSAYO			POSICIÓN CALIFICADA															
Forma	Tipo soldadura	Posición	CHAPA								TUBO							
			A tope				En ángulo				A tope				En ángulo			
			1G	2G	3G	4G	1F	2F	3F	4F	1G	2G	5G	6G	1F	2F	4F	5F
Chapa	A tope	1G	X				X	X			X				X			
		2G	X	X			X	X			X	X			X			
		3G	X		X		X	X	X		X				X			
		4G	X			X	X	X		X	X				X			
Chapa	Ángulo	1F					X								X			
		2F					X	X							X	X		
		3F					X	X	X						X			
		4F					X	X		X					X	X	X	
Tubo	A tope	1G	X				X	X			X				X	X		
		2G	X	X			X	X			X	X			X	X		
		5G	X		X	X	X		X	X	X		X		X		X	X
		6G	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Tubo	Ángulo	1F					X								X			
		2F					X	X							X	X		
		4F					X	X		X					X	X	X	
		5F					X	X	X						X	X	X	X



## ANEXO C: OTRAS CONDICIONES DE SOLDADURA CALIFICADAS.

Probeta de homologación	Calificación							
	Respaldo		Soldadura a tope				Tipo de Corriente	
	Con Respaldo	Sin respaldo	Simple	Doble	Penetración Completa	Penetración Parcial	Corriente alterna	Corriente Continua
Con Respaldo	X							
Sin respaldo	X	X						
Soldadura a tope simple			X	X				
Soldadura a tope doble				X				
Penetración Completa					X	X		
Penetración Parcial						X		
Corriente alterna							X	
Corriente Continua								X









**ANEXO E: FORMATO DE WPQR UTILIZADO**

REGISTRO DE CUALIFICACIÓN DE PRODECIMIENTO SEGÚN CÓDIGO AWS D17.1:2001 PROCEDURE QUALIFICATION TEST RECORD IN ACCORDANCE WITH AWS D17.1:2001 CODE		
WPQR No: <i>WPQR No.</i>	Soldador <i>Welder</i>	Operador de Soldeo <i>Welding Operator</i>
Nombre <i>Name</i>	N.I.F.: <i>Id. No.</i>	No trabajador: <i>Welder No.</i>
Especificación de Procedimiento de Soldadura (WPS) No: <i>Welding Procedure Specification (WPS):</i>	Rev.: <i>Rev.</i>	Fecha: <i>Date:</i>
Fecha de la Prueba de Cualificación: <i>Qualification Test Date</i>		

FOTOGRAFÍA

FOTOGRAFÍA

Ensayos Efectuados Test				
Identif. Cupón de prueba <i>(Test specimen I.D.No.)</i>	Tipo de Ensayo <i>(Type of Test)</i>	No de informe de ensayos <i>(Test report No.)</i>	Resultado del ensayo <i>(Test results)</i>	Observaciones <i>(Remarks)</i>
	Visual (VT)			
	Líquidos Penetrantes (PT)			
	Rayos X (RT)			
	Ultrasonidos (UT)			
	Tensile test			
	Bend Test			
	Partículas magnéticas (MT)			

Mireia Gaona Latorre

AWS Certified Welding Inspector CWI N° 14031491



## ANEXO F: FORMATO DE WPQ UTILIZADO

REGISTRO DE CUALIFICACIÓN DE SOLDADOR SEGÚN CÓDIGO AWS D17.1:2001 WELDER QUALIFICATION TEST RECORD IN ACCORDANCE WITH AWS D17.1:2001 CODE		
Informe No: <i>Report No.</i>	Soldador <i>Welder</i>	Operador de Soldeo <i>Welding Operator</i>
Nombre: <i>Name</i>	N.I.F.: <i>Id. No.</i>	No trabajador: <i>Welder No.</i>
Especificación de Procedimiento de Soldadura (WPS) No: <i>Company Welding Procedure Specification (WPS):</i>	Rev.:	Fecha: <i>Date:</i>
Fecha de la Prueba de Cualificación: <i>Qualification Test Date</i>		

	Variables de la Prueba de Cualificación <i>Actual values used in Qualification Test</i>				Rango de Cualificación <i>Qualification Range</i>					
Proceso de Soldeo <i>Welding Process (Table 4.1)</i>										
Metal Base / Especificación <i>Base metal / Specification (Table 4.2)</i>										
Corriente / Polaridad <i>Current / Polarity (Table 4.4)</i>	Alterna <i>AC</i>				Alterna <i>AC</i>					
	CEN <i>DCEN</i>				CEN <i>DCEN</i>					
	CCEP <i>DCEP</i>				CCEP <i>DCEP</i>					
Progresión de la Soldadura <i>Weld Progresión</i>	No aplica <i>N/A</i>				No aplica <i>N/A</i>					
	Ascendente <i>Up</i>				Ascendente <i>Up</i>					
	Descendente <i>Down</i>				Descendente <i>Down</i>					
Soldeo Por un lado/Ambos lados <i>Single Weld / Double Weld</i>	Soldeo Por un lado <i>Single Weld</i>				Soldeo Por un lado <i>Single Weld</i>					
	Ambos Lados <i>Double Weld</i>				Ambos Lados <i>Double Weld</i>					
Respaldo <i>Backing</i>	SI <i>Yes</i>				SI <i>Yes</i>					
	NO <i>No</i>				NO <i>No</i>					
Penetración: <i>Penetration</i>	Parcial <i>Partial</i>				Parcial <i>Partial</i>					
	Completa <i>Full</i>				Completa <i>Full</i>					
Posición / Tipo unión y producto <i>Position / Join and product type</i>		1G	2G	3G	4G		1G	2G	3G	4G
	Chapa a tope: <i>Sheet Groove</i>					Chapa a tope <i>Sheet Groove</i>				
		1F	2F	3F	4F		1F	2F	3F	4F
	Chapa en ángulo: <i>Sheet Fillet</i>					Chapa en ángulo: <i>Sheet Fillet</i>				
		1G	2G	3G	4G		1G	2G	3G	4G
	Tubo a tope: <i>Tube Groove</i>					Tubo a tope: <i>Tube Groove</i>				
	1F	2F	3F	4F		1F	2F	3F	4F	
Tubo en ángulo: <i>Tube Fillet</i>					Tubo en ángulo: <i>Tube Fillet</i>					
Espesores / Diameters <i>Thickness / Diameters</i>										
	Chapa a tope / Sheet Groove Chapa en ángulo / Sheet Fillet Tubo a tope / Tube Groove Tubo en ángulo / Tube Fillet				Espesor t (mm)      Diámetro (mm) <i>Thickness                  Diameter OD</i> <i>Min.    Máx.                  Min.    Máx.</i>					

Ensayos Efectuados Test				
Identif. Cupón de prueba <i>(Test specimen I.D.No.)</i>	Tipo de Ensayo <i>(Type of Test)</i>	No de informe de ensayos <i>(Test report No.)</i>	Resultado del ensayo <i>(Test results)</i>	Observaciones <i>(Remarks)</i>

FECHA DE RESULTADOS DE LA PRUEBA <i>Certification date</i>	VÁLIDEZ: INDEFINIDA CON REGISTROS SEMESTRALES <i>Validity: indefinitely provided an auditable records every 6 months.</i>
---	--

La persona mencionada en el anverso de este documento está cualificada de acuerdo con código AWS D17.1:2001 dentro de los límites de soldeo anteriormente especificados según el proceso de soldadura utilizado en este prueba de soldeo. *The above named individual is qualified in accordance with code AWS D17.1:2001 within the above limits for the welding process used for this test weld.*

**Mireia Gaona Latorre**

AWS Certified Welding Inspector CWI N° 14031491

<b>OBSERVACIONES:</b> Solo valido para soldadura en reparaciones de piezas, no para fabricación o correcciones de piezas de fabricación. <i>Only for weld repair applications. Not for fabrication. Not for corrections encountered during original manufacturing.</i>	
<b>MANTENIMIENTO DE LA CUALIFICACIÓN POR EL RESPONSABLE / COORDINADOR DEL SOLDADOR DE LA EMPRESA CON REGISTROS DOCUMENTALES CADA 6 MESES.</b> <i>EXTENDED VALIDITY OF THE QUALIFICATION BY EMPLOYER / WELDING COORDINATOR EVERY 6 MONTHS WITH RECORDS.</i>	
<b>Antes de / Before</b>  <b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo:</b> <i>Position</i>	<b>Antes de / Before</b>  <b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo:</b> <i>Position</i>
<b>Antes de / Before</b>  <b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo:</b> <i>Position</i>	<b>Antes de / Before</b>  <b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo:</b> <i>Position</i>
<b>Antes de / Before</b>  <b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo:</b> <i>Position</i>	<b>Antes de / Before</b>  <b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo:</b> <i>Position</i>
<b>Antes de / Before</b>  <b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo:</b> <i>Position</i>	<b>Antes de / Before</b>  <b>Nombre:</b> <i>Name:</i> <b>Cargo:</b> <i>Position</i>



## **ANEXO G: Equipos de Protección Individual (EPIS)**

### Ropa de trabajo

Evita la exposición del cuerpo a las radiaciones no ionizantes que se generan y debe minimizar el riesgo de quemaduras.

Debe ser de pura lana o algodón ignífugo ya que ambos tejidos se carbonizan, y evitar las fibras sintéticas ya que cuando arden se derriten dando lugar a quemaduras muy graves. Para evitar incendios derivados de la retención de partículas incandescentes, las mangas serán largas, con los puños ceñidos a la muñeca y se evitaran bolsillos exteriores.

No debe utilizarse ropa manchada de grasa, disolventes o cualquier otra sustancia inflamable. La ropa utilizada en trabajos de soldadura eléctrica debe estar libre de piezas metálicas como cremalleras, corchetes, etc.

### Guantes, polainas, manguitos y mandiles de cuero.

Protegen las manos y la ropa de trabajo de quemaduras y partículas incandescentes. Deben tener costuras interiores para evitar la retención de partículas incandescentes y mantenerse totalmente secos.

### Calzado de seguridad.

Con puntera reforzada para minimizar los riesgos derivados de caídas de objetos pesados, plantilla reforzada si son previsibles las pisadas sobre objetos punzantes y suela aislante.

### Caretas o pantallas faciales equipadas con filtros ópticos.

Protegen a la cara y a los ojos de las radiaciones no ionizantes y de la proyección de partículas.

### Protección respiratoria

Evitan la inhalación de humos y gases nocivos.





## ANEXO H: DISCONTINUIDADES EN SOLDADURAS

Las DISCONTINUIDADES más frecuentes que se encuentran en las soldaduras se resumen a continuación:

### 1) Porosidad:

Discontinuidad del tipo de cavidad formada por gas atrapado durante la solidificación del metal de soldadura. Se divide a su vez en cuatro tipos:

#### a) Porosidad uniformemente dispersa

Porosidad uniformemente distribuida a lo largo de la soldadura; causada por la aplicación de una técnica de soldadura incorrecta o por materiales defectuosos. Se evita enfriando la soldadura lo suficientemente lento para permitir que la mayor parte del gas pase a la superficie antes de la solidificación.

#### b) Porosidad agrupada (“Cluster porosity”)

Es un agrupamiento localizado de poros. Generalmente resulta por un inicio o fin inadecuado del arco de soldadura.

#### c) Porosidad alineada

Frecuentemente ocurre a lo largo de la interfase metal de soldadura/metal base, la interfase entre cordones de soldadura, o cerca de la raíz de soldadura, y es causada por la contaminación que provoca el gas por su evolución en esos sitios.

#### d) Porosidad vermicular o tipo gusanos (“Piping porosity”)

Es un poro de gas alargado. Este tipo de porosidad de soldadura se extiende desde la raíz hasta la superficie de la soldadura. Cuando uno o más poros son vistos en la superficie de la soldadura, un cuidadoso descarte puede también revelar porosidad subsuperficial. De todas formas, muchas de las porosidades vermiculares encontradas en soldaduras no se extienden hasta la superficie.

### 2) Inclusiones (“Inclusions”)

#### a) Inclusiones de escoria (“Slag inclusions”)

Son sólidos no metálicos atrapados en el metal de soldadura o entre el metal de soldadura y el metal base. No se da en soldadura TIG ya que no se utilizan electrodos recubiertos.

b) Inclusiones de Tungsteno

Son partículas de Tungsteno atrapadas en el metal de soldadura y son exclusivas del proceso GTAW (TIG). Si el electrodo es sumergido en el metal, o si la corriente es fijada en un valor muy alto, se depositarán gotitas de Tungsteno, o se romperá la punta del electrodo y quedará atrapado en la soldadura. Dichas inclusiones aparecen como manchas claras en la radiografía, pues el Tungsteno es más denso y absorbe más radiación.

### **3) Fusión incompleta (“Incomplete fusion”)**

Discontinuidad causada por la falta de unión entre los cordones de soldadura y el metal base, o entre los cordones de la soldadura. Es el resultado de técnica de soldadura, preparación del metal base, o diseño de la junta inapropiados.

### **4) Penetración incompleta o falta de penetración (“Incomplete joint penetration”)**

Ocurre cuando el metal de soldadura no se extiende a través de todo el espesor de la junta. Esta puede resultar de un insuficiente aporte de calor de soldadura, diseño de la junta inapropiado (por ejemplo demasiado espesor para ser penetrado por el arco, o chanfle insuficiente), o control lateral inapropiado del arco de soldadura.

### **5) Fisuras (“Cracks”)**

Ocurren en el metal base y en el metal de aporte, cuando las tensiones localizadas exceden la resistencia última del material.

Las fisuras pueden clasificarse en:

- a) Fisuras en caliente: se desarrollan durante la solidificación y su propagación es intergranular (entre granos).
- b) Fisuras en frío: se desarrollan tras la solidificación, son asociadas comúnmente a la fragilización por hidrógeno. Se propagan entre y a través de los granos (inter y transgranular).



Según su forma, las fisuras también se pueden clasificar en:

- a) Fisuras longitudinales: son paralelas al eje de la soldadura.
- b) Fisuras transversales: generalmente son el resultado de esfuerzos debido a contracciones longitudinales actuando en metales de soldadura de baja ductilidad.
- c) Cráteres: ocurren cuando el arco es terminado incorrectamente. Generalmente tienen forma de estrella.

#### **6) Socavadura / mordedura (“Undercut”)**

Asociadas generalmente con técnicas inapropiadas y/o corrientes excesivas de soldadura. La socavadura es una muesca o canaleta o hendidura ubicada en los bordes de la soldadura; es un concentrador de tensiones y además disminuye el espesor de las chapas. Pueden darse en la raíz o en la cara de la soldadura. Cuando la longitud de la mordedura está dentro de los límites especificados y no constituye una muesca profunda, no es considerada un defecto de soldadura.

#### **7) Concavidad (“Underfill”)**

Se produce cuando el metal de soldadura en la superficie de la cara externa, o en la superficie de la raíz interna, posee un nivel que está por debajo de la superficie adyacente del metal base.

#### **8) Garganta insuficiente (“Insufficient throat”)**

Puede ser debido a una depresión en la cara de la soldadura en ángulo, disminuyendo la garganta, cuya dimensión debe cumplir la especificación dada por el proyectista para el tamaño del cordón de soldadura en ángulo.

#### **9) Catetos demasiado cortos (“Insufficient legs”)**

Es un tamaño menor que el adecuado para su uso, en los catetos de la soldadura en ángulo. Es de índole similar a la discontinuidad anterior.

#### **10) Solape (“Overlap”) (Metal de soldadura apoyado sobre el metal base sin fundirlo)**

Es la porción que sobresale del metal de soldadura más allá del límite de la soldadura o de su raíz. Se produce un falso borde de la soldadura, estando el metal de soldadura apoyado sobre el metal base sin haberlo fundido. Este metal de

soldadura solapado es una discontinuidad superficial que forma un concentrador de tensiones similar a una fisura y, por consiguiente, casi siempre es considerada inadmisibles (defecto).

### **11) Sobremonta excesiva (“Weld reinforcement”)**

La sobremonta es un concentrador de tensiones y, además, un exceso de ésta aumenta las tensiones residuales, presentes en cualquier soldadura, debido al aporte sobrante. Por estos motivos las normas limitan el valor de R, que en general no debe exceder de 1/8” (3mm).

### **12) “Laminaciones” (“Laminations”)**

Son discontinuidades planas y alargadas en el metal base, encontrándose normalmente en la parte media del espesor de los materiales forjados (como lo son las planchas de acero utilizadas para construcción de recipientes o tanques, que se producen por laminado (rolado), el cual es un proceso de forja).

Las “laminaciones” pueden ser totalmente internas y en este caso serán detectadas sólo mediante UT. Si por el contrario se extienden hasta un borde de la plancha pueden ser detectadas mediante MT o PT.

### **13) Fisuras laminares (“Lamellar tears”)**

Son fracturas en forma de terraza en el metal base, con orientación básicamente paralela a la superficie forjada. Son causadas por altos esfuerzos en la dirección del espesor que resultan del proceso de soldadura.

### **14) Golpes de arco / apertura de arco / arranque de arco / chisporroteo (en el material base fuera de la soldadura) (“Arc strike”)**

Imperfección localizada en la superficie del metal base, caracterizada por una ligera adición o falta de metal, resultante de la apertura accidental del arco eléctrico. Normalmente se depositará sobre el metal base una serie de pequeñas gotas que pueden originar microfisuras. Para evitar la aparición de microfisuras esas pequeñas gotas deben ser eliminadas mediante amolado de la superficie afectada.

### **15) Desalineación (“High – Low”)**

Esta discontinuidad se da cuando en las uniones soldadas a tope las superficies que deberían ser paralelas se presentan desalineadas. Las normas limitan esta desalineación, normalmente en función del espesor de las partes a soldar.

