

Proyecto Fin de Master Ingeniería Industrial

Estudio de modificación de propiedades mecánicas
tras reparaciones de soldadura en Titanio.

Autor: Gonzalo Cabot Cienfuegos

Tutor: Carpóforo Vallellano Martín

Rodrigo De Haro García

Miguel Ángel Esteban

**Dep. de Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Estudio de modificación de propiedades mecánicas tras reparaciones de soldadura en Titanio.

Autor:

Gonzalo Cabot Cienfuegos

Tutor:

Carpóforo Vallellano Martín

Catedrático de Ingeniería de los Procesos de Fabricación

Rodrigo De Haro García

Responsable de Ingeniería en Airgrup

Miguel Ángel Esteban

Responsable de Ingeniería de Soldadura en Airgrup

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Máster: Estudio de modificación de propiedades mecánicas tras reparaciones de soldadura en Titanio.

Autor: Gonzalo Cabot Cienfuegos

Tutor: Carpóforo Vallellano Martín

Rodrigo De Haro García

Miguel Ángel Esteban

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Por supuesto, en primer lugar, a mis padres por el apoyo que me han dado durante toda la duración del proyecto.

Por otro lado, agradecer a AIRGRUP S.L, por permitirme realizar este proyecto, poniendo a nuestra disposición todos los medios necesarios, tanto de personal como de instalaciones y materiales. En este sentido agradecerles principalmente a mis tutores dentro de la empresa para este proyecto, Miguel Ángel Esteban y Rodrigo de Haro, por depositar su confianza en mí para realizar este proyecto, y por su paciencia y colaboración siempre que lo he necesitado.

También agradecer a mi tutor por parte de la universidad el profesor Carpóforo Vallellano por prestarme sus conocimientos y ayudarme en la elaboración de este proyecto.

Por último, agradecer a mis excompañeros Javier Crespo y Marco Isidoro por echarme una mano a la hora de hacer rodar el proyecto.

Gonzalo Cabot Cienfuegos

Sevilla, 2019

Resumen

El fin del presente documento es el de introducirnos en el mundo de la soldadura a través de la realización de un estudio sobre cómo afectan a las propiedades mecánicas del titanio aeronáutico las reparaciones efectuadas en soldadura.

La soldadura es uno de las operaciones más críticas y empleadas en el proceso de fabricación de componentes aeronáuticos. Por ello, en primera instancia, se definen a modo introductorio los procesos de soldeo más empleados, entrando en más detalle en la tecnología de soldeo por TIG (tungsten inert gas), la cual es una de las más utilizadas en el sector aeronáutico, y para la que se describen el equipo empleado en el proceso, los parámetros influyentes en la calidad del soldeo y las distintas técnicas operativas.

A continuación, estudiaremos en profundidad el material utilizado para realizar nuestros ensayos: el titanio. El titanio es, junto al aluminio, el acero y los composites, uno de los materiales más utilizados en la industria aeronáutica. Su elevado empleo en este sector se debe principalmente a su baja densidad, alta resistencia y a la capacidad para soportar elevadas temperaturas de trabajo, aunque presenta el inconveniente de ser un material con un coste muy elevado. El titanio puede combinarse con otros elementos para formar aleaciones con características muy mejoradas respecto al titanio puro, este es el caso de la aleación Ti-6Al-4V, aleación que representa, debido a sus características bien balanceadas, más del 60% del conjunto de aleaciones de titanio empleadas en el sector aeronáutico, motivo por el cual será utilizada para fabricar las probetas requeridas para llevar a cabo nuestro estudio. También se han mencionado los distintos procesos de soldeo existentes para el soldeo de titanio, añadiendo los parámetros más importantes a controlar en cada uno de los mismos.

Por último, se expondrán los resultados de los ensayos de tracción y dureza, los cuales se han utilizado para poder valorar los cambios producidos en las características mecánicas de la unión soldada dependiendo del número de reparaciones a las que se ha visto sometida. Se han utilizado probetas de 1 y 2 mm de espesor, soldadas por TIG en unión tope-tope. Se han simulado desde soldaduras óptimas hasta soldaduras con 5 reparaciones, las cuales se han realizado bien a través de todo el cordón de soldadura, simulando una reparación completa, o bien a través de una parte del mismo, simulando reparaciones parciales.

Se puede apreciar en los resultados como disminuyen las propiedades de resistencia y ductilidad del material conforme aumenta el número de reparaciones de forma aproximadamente lineal, siendo este efecto el doble de pronunciado en las probetas de 1 mm de espesor, apreciándose una caída de 45,94% en la carga de rotura del material desde la soldadura óptima hasta las sometidas a 5 reparaciones. Sin embargo, no se aprecian diferencias significativas en la dureza de la ZAT, ni ningún incremento ni disminución de esta característica conforme se aumentan las reparaciones. Por último, se proponen futuras vías de desarrollo en relación con el tema tratado.

Abstract

The purpose of this document is to break into the world of welding technologies through the implementation of a survey about how welding repairs affect the mechanical properties of aeronautical titanium.

Welding is one of the most critical manufacturing processes used in the production of aeronautical components. Therefore, the most commonly welding processes used are described in first chapters, entering into more detail on TIG (tungsten inert gas) welding technology, which is one of the most used in the aeronautical sector. Furthermore, the equipment used in the manufacturing process, the influencing parameters in welding quality and the different operating techniques are described.

Next, will be in depth studied the material used to carry out the tests: titanium. Titanium is, together with aluminum, steel and composites, one of the most used materials in the aviation industry. Its high usage in this sector is mainly due to its low density, high resistance and its ability to withstand high working temperatures. However, it is quite expensive. Titanium can be combined with other elements to form alloys with very improved characteristics in relation to pure titanium, this is the case for Ti-6Al-4V alloy, which represents, due to its well-balanced characteristics, up to 60% of the total of Titanium alloys used in the aeronautical sector. That is the reason why it shall be used to manufacture the specimens required to carry out our survey. The different welding processes for titanium welding have been mentioned. Moreover, the most important parameters to be controlled in any one of them have been described.

Finally, the results of the tensile and hardness tests will be shown, which have been used to analyse changes in mechanical characteristics of the solder joint depending on the number of repairs that have taken place. 1 And 2 mm thick specimens have been used, joined by butt welding TIG. They have been simulated from optimal welds to welds with 5 repairs, which have been done either through the entire weld bead, simulating a complete repair, or through a part of it, simulating partial repairs.

It can be seen in the results how the strength and ductility properties of the material decrease as the number of repairs increase, this effect is twice more pronounced in the 1 mm thick specimens, showing a drop of 45,94 % in the breaking load of the material from the optimal welding to those under 5 repairs. However, there are no significant differences in the hardness of the HAZ, not any increase or decrease in this characteristic as repairs increase. Finally, future paths of development are proposed in relation to the topic discussed.

Índice

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	1
1 INTRODUCCIÓN A LA SOLDADURA. PROCESOS DE SOLDEO	3
1.1 <i>Introducción histórica</i>	3
1.2 <i>Procesos de soldeo</i>	4
1.2.1 Soldadura por oxigas	5
1.2.2 Soldeo por arco eléctrico	6
1.2.3 Soldeo por láser	8
2 SOLDADURA TIG	11
2.1 <i>Equipo de soldeo</i>	11
2.1.1 Fuentes de energía	12
2.1.2 Sopletes	12
2.2 <i>Parámetros del proceso</i>	13
2.2.1 Electroodos	13
2.2.2 Tipos de corriente	14
2.2.3 Intensidad de soldeo	16
2.2.4 Material de aportación	16
2.2.5 Gases de protección	17
2.2.6 Velocidad de soldeo	19
2.3 <i>Técnicas operativas</i>	19
2.3.1 Preparación de la unión	19
2.3.2 Proceso TIG manual	19
2.3.3 TIG con arco pulsado	19
2.3.4 Soldeo orbital	20
2.4 <i>Ventajas e inconvenientes del proceso</i>	20
3 TITANIO. ALEACIONES, PROPIEDADES Y APLICACIONES AERONÁUTICAS	23
3.1 <i>Fases del titanio</i>	23
3.2 <i>Aleaciones de titanio</i>	25
3.2.1 Clasificación de las aleaciones de titanio	25
3.2.2 Titanio comercialmente puro	26
3.2.3 Aleaciones alfa	27
3.2.4 Aleaciones beta	29
3.2.5 Aleaciones alfa+beta	30
3.3 <i>Conformado del titanio</i>	32

3.4	<i>Mecanizado del titanio</i>	33
3.5	<i>Tratamientos térmicos</i>	33
3.5.1	Recocido	34
3.5.2	Envejecimiento y precipitación	34
3.5.3	Alivio de tensiones	35
3.6	<i>Soldadura del titanio</i>	35
3.6.1	Resistencia a la fisuración	36
3.6.2	Materiales de aporte	37
3.6.3	Efectos metalúrgicos de la soldadura	37
3.6.4	Protección durante el soldeo	37
3.6.5	Porosidad en la soldadura	37
3.6.6	Proceso de soldeo	38
3.6.7	Procesos de soldeo de titanio	39
4	ESPECIFICACIONES EN EL PROCESO DE SOLDADURA TIG DE TITANIO	45
4.1	<i>Clasificación</i>	45
4.2	<i>Material de aporte</i>	45
4.3	<i>Gases de protección</i>	46
4.4	<i>Electrodos</i>	46
4.5	<i>Limpieza previa</i>	47
4.5.1	Desengrase	47
4.5.2	Limpieza alcalina	48
4.5.3	Enjuague posterior a la limpieza alcalina	48
4.5.4	Eliminación de contaminación metálicas	48
4.5.5	Enjuague posterior a la eliminación de contaminantes metálicos	48
4.5.6	Decapado fluo-nítrico	48
4.5.7	Enjuague posterior al decapado.	49
4.5.8	Desoxidado	49
4.5.9	Enjuague final	49
4.5.10	Secado	50
4.6	<i>Posicionamiento de las juntas</i>	50
4.7	<i>Soldeo</i>	51
4.7.1	Soldadura en ángulo	51
4.7.2	Soldadura a tope	52
4.8	<i>Limpieza final</i>	53
4.9	<i>Criterios de aceptación y rechazo</i>	53
4.10	<i>Inspecciones</i>	58
4.11	<i>Reparaciones</i>	60
5	ENSAYOS MECÁNICOS	61
5.1	<i>Ensayo de tracción.</i>	61
5.1.1	Límite elástico	62
5.1.2	Tensión de rotura	63
5.1.3	Alargamiento	63
5.1.4	Estricción	64
5.1.5	Trabajo absorbido o energía absorbida	64
5.1.6	Especificaciones del ensayo	64
5.2	<i>Ensayo de dureza Rockwell</i>	66
5.2.1	Procedimiento	66
5.2.2	Especificaciones de los ensayos	67
	CAPÍTULO 2: ENSAYOS	71
6	PROCESO DE ADQUISICIÓN DE PROBETAS	73

6.1	<i>Características de las chapas adquiridas en ensayos de tracción y dureza</i>	73
6.2	<i>Proceso de soldeo</i>	74
6.2.1	<i>Parámetros de soldeo</i>	75
6.3	<i>Dimensiones de las probetas</i>	76
6.4	<i>Designación de las probetas</i>	76
7	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS	77
7.1	<i>Metodología</i>	77
7.2	<i>Resultados de los ensayos de tracción y discusión de los resultados</i>	77
7.2.1	<i>Probetas de 1 mm de espesor sometidas a reparaciones completas</i>	77
7.2.2	<i>Probetas de 2 mm de espesor sometidas a reparaciones completas</i>	79
7.2.3	<i>Probetas de 1 mm de espesor sometidas a reparaciones parciales</i>	82
7.2.4	<i>Probetas de 2 mm de espesor sometidas a reparaciones parciales</i>	83
7.3	<i>Resultados de los ensayos de dureza y discusión de los resultados</i>	84
8	CONCLUSIONES	89
8.1	<i>Posible continuación del estudio</i>	89
	Referencias	91
	ANEXO I: IMÁGENES DE LAS PROBETAS ENSAYADAS A TRACCIÓN	1
	ANEXO II: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN	13
	ANEXO III: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DUREZA	21

Índice de tablas

Tabla 1-1. Clasificación de los procesos de soldeo [1]	5
Tabla 2-1. Diámetros más típicos de electrodos y sus correspondientes toberas [7]	14
Tabla 2-2. Resultado del soldeo según la corriente usada [7]	14
Tabla 2-3. Selección del tipo de corriente para distintos materiales [7]	16
Tabla 3-1. Clasificación de aleaciones de titanio [9]	26
Tabla 3-2. Propiedades mecánicas y composición del titanio comercialmente puro [10]	27
Tabla 3-3. Propiedades mecánicas aleaciones alfa más importantes [27]	27
Tabla 3-4. Propiedades mecánicas y aplicaciones de las aleaciones beta más importantes [27]	29
Tabla 3-5. Propiedades mecánicas y aplicaciones de las aleaciones alfa + beta más importantes [27]	30
Tabla 3-6. Soldabilidad de las aleaciones de titanio [21]	35
Tabla 3-7. Ventajas e inconvenientes del soldeo de las aleaciones de titanio [21]	36
Tabla 3-8. Condiciones típicas de soldeo MIG de titanio [21]	39
Tabla 3-9. Condiciones típicas de soldeo por plasma de titanio [21]	40
Tabla 3-10. Condiciones típicas de soldeo por haz de electrones de titanio [21]	40
Tabla 4-1. Metales de aporte [13]	45
Tabla 4-2. Composición y designación de las varillas [14]	46
Tabla 4-3. Pureza del gas de protección [13]	46
Tabla 4-4. Características del electrodo empleado [15]	47
Tabla 4-5. Diámetro del electrodo [13]	47
Tabla 4-6. Condiciones del producto en el desengrase [16]	47
Tabla 4-7. Condiciones del producto en la limpieza alcalina [16]	48
Tabla 4-8. Condiciones del producto en eliminación de contaminantes [16]	48
Tabla 4-9. Condiciones del producto en el decapado fluo-nítrico [16]	49
Tabla 4-10. Condiciones del producto en el desoxidado [16]	49
Tabla 4-11. Anchura de encastre en las uniones soldadas [13]	50
Tabla 4-12. Valores de ancho de garganta y longitud en función del tipo de unión [13]	51
Tabla 4-13. Decoloraciones aceptables en soldadura de titanio [13]	53
Tabla 4-14. Criterios de aceptación y rechazo según norma militar [13]	54
Tabla 4-15. Criterios e aceptación y rechazo según norma civil [18]	56
Tabla 4-16. Inspecciones no destructivas	59
Tabla 5-1. Obtención de los valores de dureza Rockwell [24]	67

Tabla 5-2 Símbolos de escala en el ensayo de dureza Rockwell [24]	67
Tabla 5-3. Tolerancias de los distintos parámetros [24]	69
Tabla 7-1. Resultados del ensayo de tracción para soldadura completa de 1 mm de espesor	77
Tabla 7-2. Resultados del ensayo de tracción para soldadura completa de 2 mm de espesor	79
Tabla 7-3. Resultados del ensayo de tracción para probetas sometidas a reparaciones parciales 1 mm de espesor	82
Tabla 7-4. Resultados del ensayo de tracción para probetas sometidas a reparaciones parciales 2 mm de espesor	83
Tabla 7-5. Resultados de dureza en Rockwell B para las probetas de 1 mm de espesor	85
Tabla 7-6. Resultados de dureza en Rockwell B para las probetas de 2 mm de espesor	86

Índice de Figuras

Figura 1-1. Curva característica del arco [3]	7
Figura 1-2. Métodos de transferencia del metal de aportación en el soldeo MIG [4]	8
Figura 1-3. Montaje típico de soldeo por láser [6]	9
Figura 2-1. Componentes en el proceso TIG [6]	11
Figura 2-2. Instalación típica para soldadura TIG [7]	12
Figura 2-3. Portaelectrodo con refrigeración por agua [7]	13
Figura 2-4. Corriente alterna con impulsos de alta frecuencia [7]	15
Figura 2-5. Voltaje necesario para mantener la intensidad del arco en argón y helio [6]	18
Figura 2-6. Aspecto de la penetración usando helio (izquierda) y argón (derecha) [6]	18
Figura 2-7. Técnica para realizar el soldeo TIG manual [7]	19
Figura 2-8. Ciclo de corriente en el soldeo por arco pulsado [7]	20
Figura 2-9. Ejemplo de empleo de soldeo orbital [7]	20
Figura 3-1. Estructuras del titanio [27]	24
Figura 3.2. Diagrama de fases del titanio [25]	25
Figura 3-3. Compresor y rodete fabricados de Ti-6242 [26]	28
Figuras 3-4 a y b. Tren de aterrizaje y piezas de precisión empleadas en el Boeing 777 [26]	30
Figura 3.5. Gran forjado de Ti-6Al-4V para el tren de aterrizaje del Boeing 747 [26]	31
Figura 3.6. Grandes aspas de ventiladores (la más grande de más de un metro) fabricadas de Ti-6Al-4V forjado [26]	31
Figura 3.7. Efecto Baushinger en el Ti-6Al-4V [25]	32
Figura 3-8. Diagrama de fases del Ti-6Al-4V [12]	34
Figura 3-9. Arreglo típico en soldadura de titanio [4]	38
Figura 4-2. Apertura de encastre sin apertura [13]	50
Figura 4-3. Apertura de encastre con apertura [13]	50
Figura 4-4. Tipo de contorno en soldaduras a tope con canto levantado [13]	52
Figura 4-5. Penetración de solape en soldaduras a tope realizadas por ambos lados [13]	53
Figura 5-1. Máquina de ensayo de tracción real [19]	61
Figura 5-2. Curva tensión-deformación [22]	62
Figura 5-3. Determinación del límite elástico [22]	63
Figura 5-4. Tensión de rotura [22]	63
Figura 5-5. Energía absorbida [22]	64

Figura 5-6. Diseño de las probetas para el ensayo de tracción [23]	65
Figura 5-7. Diagrama de fuerzas aplicadas sobre la probeta en el ensayo Rockwell [24]	66
Figura 5-8. Distancias admisibles entre mediciones [24]	69
Figura 6.1. Modelo de chapa marcada elaborado con CATIA V5	73
Figura 6.2. Proceso de punteo sin usar material de aporte	74
Figura 6.3. Operario realizando el soldeo en cámara inerte	75
Figuras 6.4 A y B. Eliminación del cordón de soldadura para simular la reparación	75
Figura 6.5. Plano con dimensiones de las probetas resultantes	76
Figura 6.6. Nomenclatura empleada para identificar las probetas	76
Figura 7-1. Resultados de resistencia para soldadura completa de 1 mm de espesor	78
Figura 7-2. Resultados de ductilidad para soldadura completa de 1 mm de espesor	79
Figura 7-3. Deformaciones ocasionadas por la soldadura en una probeta sometida a 2 reparaciones	79
Figura 7-4. Resultados de resistencia para soldadura completa de 2 mm de espesor	80
Figura 7-5. Resultados de ductilidad para soldadura completa de 2 mm de espesor	81
Figura 7-6. Geometría de una probeta que no ha sido sometida a ninguna reparación	81
Figura 7-7. Geometría de una probeta sometida a 5 reparaciones	81
Figura 7-8. Resultados de resistencia para probetas de 1 mm de espesor sometidas a reparaciones parciales	82
Figura 7-8. Resultados de ductilidad para probetas de 1 mm de espesor sometidas a reparaciones parciales	83
Figura 7-9. Resultados de resistencia para probetas de 2 mm de espesor sometidas a reparaciones parciales	84
Figura 7-10. Resultados de ductilidad para probetas de 1 mm de espesor sometidas a reparaciones parciales	84
Figura 7-11. Evolución de la dureza para distinto número de reparaciones completas de 1 mm de espesor	87
Figura 7-12. Evolución de la dureza para distinto número de reparaciones parciales de 1 mm de espesor	87
Figura 7-13. Evolución de la dureza para distinto número de reparaciones completas de 2 mm de espesor	88
Figura 7-14. Evolución de la dureza para distinto número de reparaciones parciales de 2 mm de espesor	88

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1 INTRODUCCIÓN A LA SOLDADURA. PROCESOS DE SOLDEO

Se comenzará la elaboración de este trabajo con una introducción histórica del proceso de soldeo, centrándonos sobre todo en los siglos XIX y XX, cuando se comenzó a desarrollar la soldadura tal y como la conocemos hoy. En esta introducción también se hará una breve descripción de los distintos procesos de soldeo existentes en la actualidad.

1.1 Introducción histórica

La soldadura se dice que apareció por primera vez hace unos 2.500 años en la ciudad griega de Khios, donde un herrero llamado Glaukos inventó la manera de soldar el hierro. Su procedimiento se basaba en calentar las piezas de metal a través de una forja para conseguir ablandarlas, para posteriormente unir las utilizando el martilleo hasta conseguir que formaran una sola unidad. Este proceso de soldadura por forjado continuó sin demasiados cambios hasta finales del siglo XIX y principios del XX, cuando fueron accesibles industrialmente fuentes caloríficas lo suficientemente intensas como para producir la fusión del material localizada en los bordes a unir. De esta forma nace el soldeo por arco eléctrico, el oxiacetilénico y el soldeo por resistencia.

Así, en el año 1.881, el francés A. De Meritens logró unir placas de plomo de una batería haciendo uso del arco eléctrico, que fue descubierto en el año 1.801 por el británico Sir Humphrey Davy. Para ello conectó las placas al polo positivo de la fuente de corriente y una varilla cilíndrica de carbono al negativo, controlando la distancia entre ellos. El calor liberado por el proceso fue suficiente para la unión de las piezas.

Posteriormente, en 1.885 N. De Benardos y S. Olszewsky, a partir de los estudios de De Meritens, desarrollaron un proceso de soldeo que empleaba electrodos de carbono. La única diferencia con respecto al proceso de De Meritens era que se conseguía facilitar la operación gracias a la sujeción del electrodo de carbono mediante una pinza aislante.

En 1889, N.G. Slavianoff en Rusia y C. Coffin en U.S.A. consiguieron realizar una evolución del proceso gracias a la sustitución del electrodo de carbono por una varilla metálica, de forma que el arco se producía entre la pieza y la varilla, provocando la fundición gradual de esta última de forma que el material fundido se incorporaba a la unión soldada. Sin embargo, la aplicación de este método se fue incorporando gradualmente, ya que no se disponía de electrodos de la suficiente calidad.

A partir de 1.912 fue cuando consiguió asentarse más esta tecnología gracias al invento de Strohmenger, que patentó en U.S.A. un electrodo fuertemente recubierto, capaz de producir a escala industrial soldaduras con buenas propiedades mecánicas. En estos primeros años el soldeo por arco se usó para la reparación de piezas desgastadas o dañadas, y a partir de la Primera Guerra Mundial se comenzó a usar como técnica de unión en la construcción.

A lo largo de esta época se utilizó más el soldeo por resistencia, debido a que no presentaba problemas metalúrgicos tan grave como el soldeo por arco. Este proceso de soldeo fue ideado por primera vez por James Joule, que consiguió tener éxito en el proceso de soldeo utilizando una corriente eléctrica y una resistencia eléctrica como fuente de calor. El soldeo por resistencia fue posteriormente perfeccionado por Elihu Thomson en 1.885. En 1.920 ya estaba plenamente establecido el soldeo por puntos, utilizado para la unión de chapas finas solapadas.

A partir de 1.930 fue cuando comenzó el auge del soldeo por arco eléctrico, usándose sobre todo en barcos y acorazados. Cinco años más tarde se implementó también el uso de la corriente alterna gracias a que se solucionó el empleo de un arco inestable a partir del desarrollo de recubrimientos que aseguraban una mejor ionización. Fue por esta década también cuando se comenzó a emplear el acero inoxidable. Esto es porque se

solucionó el problema de la porosidad que provocaba el hidrógeno procedente del recubrimiento a partir de la creación de electrodos con bajo contenido en hidrógeno.

A finales de la década de los treinta se empezaron a utilizar gases inertes como medio de protección para soldar metales muy reactivos como el aluminio o el magnesio. El primer proceso con este tipo de protección utilizó el helio como gas de protección y un electrodo no consumible de tungsteno. Este proceso recibió el nombre de TIG (Tungsten Inert Gas).

El TIG resolvió los problemas que se presentaban al soldar metales con una alta reactividad. Sin embargo, no era demasiado útil a la hora de soldar secciones de gran espesor o metales altamente conductores del calor. Para solventar estos problemas, en 1948, el electrodo de tungsteno fue sustituido por una varilla consumible, surgiendo así un nuevo proceso de soldeo llamado MIG (Metal Inert Gas). Sin embargo, los gases de protección utilizados (argón y helio) eran demasiado caros de obtener, por lo que para la soldadura del acero se sustituyeron por una mezcla más económica conformada por el gas inerte, oxígeno y anhídrido. Este nuevo proceso recibió el nombre de MAG (Metal Active Gas).

A partir de los años sesenta los diferentes procesos alcanzaron un alto nivel de desarrollo, consiguiendo mayores automatizaciones y mecanizaciones. Además, se optimizó el control de la calidad por medio de la realización de ensayos no destructivos, como ultrasonidos, radiografías, líquidos penetrantes y partículas magnéticas.

Por último, en los últimos años se han desarrollado procesos de soldeo que requieren una elevada energía, tales como el soldeo por láser y por haz de electrones. Aunque todavía estos procesos están relegados a campos específicos.

1.2 Procesos de soldeo

En la tabla 1.1 podremos ver como se clasifican los procesos de soldeo en función de:

- La clase de energía utilizada.
- La fuente de energía
- El esfuerzo mecánico empleado
- El tipo de protección.

Posteriormente también se pasará a la descripción de algunos de estos procesos más utilizados, aunque no se entrará a explicarlos en profundidad debido a la gran extensión que adquiriría el documento si esto se hiciera.

Tabla 1-1. Clasificación de los procesos de soldeo [1]

SOLDEO POR FUSIÓN					
Clase de energía	Fuente de energía	Esfuerzo mecánico	Tipo de protección	Procesos	
Eléctrica	Arco		Gas	MIG	
				MAG	
				TIG	
				PAW (Arco Plasma)	
				SMAW (Electrodo revestido)	
	Presión			Fundente	SAW (Arco sumergido)
					FCAW (Alambre tubular)
					PEW (Percusión)
					SW (Espárragos)
					ESW (Electro escoria)
Resistencia				RSW (Puntos)	
				RSEW (Costura)	
				RPW (Protuberancias)	
Inducción				FW (Chispa)	
				HFRW (Alta frecuencia)	
Química	Llama		Fundente	HFIW (Inducción)	
				OAW (Oxiacetilénica)	
				OHW (Oxídrica)	
	Presión				Otros gases
					PGW (Oxiacetilénica y presión)
Radiación	Reacción de productos sólidos		Fundente	TW (Termita)	
	Partículas		Vacío	EBW (Haz de electrones)	
	Electromagnéticas			LBW (Láser)	

1.2.1 Soldadura por oxigas

El soldeo oxigas es un proceso de soldeo por fusión, en el que se utiliza la energía producida por una reacción química para fundir el metal, tanto el base como el de aportación. La reacción química es un proceso de combustión en el que se emplea como comburente al oxígeno, que se filtra desde el aire, y como combustible se pueden usar distintos gases como el acetileno, el propano, el gas natural, etc.

Esta reacción produce una llama, que es dirigida mediante un soplete a las piezas a unir, y que será dirigida por el soldador. En este proceso las fuentes de calor y de deposición del material de aporte son independientes, por lo que el soldador podrá elegir entre aplicar el calor de la llama directamente sobre el metal base o sobre el metal de aportación. Gracias a esto se consigue obtener un gran control sobre la temperatura del baño de fusión a través de la velocidad de avance y de la velocidad de deposición del material de aportación.

En cuanto al resultado final de la soldadura, se consigue obtener una unión metalúrgica con gran facilidad, además de una adecuada homogeneidad de propiedades. No obstante, debido a la alta aportación de calor, se

pueden producir algunos defectos en la unión soldada tales como pérdida del estado metalúrgico del material, segregaciones durante el enfriamiento, distorsiones mecánicas, tensiones internas, etc.

En los últimos tiempos este método de soldeo está en desuso debido al auge de la soldadura por arco, sin embargo, se sigue utilizando para soldar pequeños espesores y para pequeñas producciones, además de en reparaciones.

1.2.1.1 Ventajas e inconvenientes del proceso

Resumidamente, el proceso de soldeo por oxigas presenta las siguientes ventajas e inconvenientes [2]:

- Ventajas:
 - El soldador tiene control sobre la fuente de calor y sobre la temperatura de forma independiente del control sobre el metal de aportación.
 - El equipo de soldeo necesario es de bajo coste, normalmente portátil y muy versátil ya que se puede utilizar para otras operaciones relacionadas con el soldeo, como oxicorte, pre y postcalentamiento, enderezado, doblado, recargue, soldeo fuerte y cobresoldeo, con sólo cambiar o añadir algún accesorio.
- Inconvenientes:
 - El proceso es lento, de baja productividad y destinado a espesores pequeños exclusivamente, ya que, aunque se puede realizar el soldeo de grandes espesores resulta más económico para éstos el soldeo por arco eléctrico.
 - Se producen grandes deformaciones y grandes tensiones internas causadas por el elevado aporte térmico del proceso, debido a la baja velocidad de soldeo.

1.2.1.2 Procesos derivados

Dependiendo del tipo de combustible utilizado se producirán distintos tipos de llamas con propiedades diferentes, de las cuales se derivarán los siguientes procesos de soldeo:

- **Llama oxiacetilénica:** Utiliza acetileno como combustible. Es la más utilizada debido a su flexibilidad y a la facilidad para su regulación.
- **Llama oxígeno-hidrógeno:** Utiliza como combustible el hidrógeno, produciendo una llama de color azul pálido. Se utiliza para el soldeo de aleaciones cuya temperatura de fusión no sea muy elevada.
- **Llama oxígeno-propano:** Utiliza propano como combustible y se usa para soldar metales blandos. Es más barato con respecto a la mezcla oxiacetilénica, sin embargo, el proceso de combustión es más lento.

1.2.2 Soldeo por arco eléctrico

Es el proceso de soldadura más utilizado, en él, se utiliza la corriente eléctrica para crear un arco eléctrico entre el metal base y el electrodo, de donde se añadirá el material de aporte. Se utilizará el calor desprendido por la energía eléctrica para llevar a cabo la soldadura.

Para llevar a cabo el proceso de soldeo, el soldador deberá elegir un electrodo adecuado y sujetar la pieza de trabajo a unas pinzas que van conectadas al cable de tierra. Una vez hecho esto, habrá que ajustar la corriente eléctrica para crear el arco, y a continuación, se deberá mover el electrodo a través de la unión del metal que se desea soldar, con la velocidad adecuada para que al metal le dé tiempo a fundirse. El metal de aporte procederá del electrodo, que se mezclará con el metal fundido del material base para conformar el cordón de soldadura.

Para que se establezca el arco eléctrico necesitaremos situar dos bornes conductores enfrentados a una misma distancia, uno de ellos cargado negativamente (cátodo), y el otro cargado positivamente (ánodo). Una vez la tensión alcanza un valor determinado (tensión umbral), los electrones abandonan el cátodo para dirigirse hacia el ánodo, produciéndose en ese momento la chispa. Durante la translación de los electrones, éstos

interaccionan con el medio ionizando los gases y transformando el medio gaseoso en un plasma conductor que permite obtener un arco estable.

La temperatura del arco producido puede variar según la zona entre los 3.000 y los 30.000 °C, y puede ser controlado a través de la tensión e intensidad, que también dependerá de la distancia entre los bornes. En la figura 1-1 podremos observar la curva característica del arco eléctrico, dependiente de tensión e intensidad.

Podemos observar que existen dos zonas diferenciadas en la curva característica del arco:

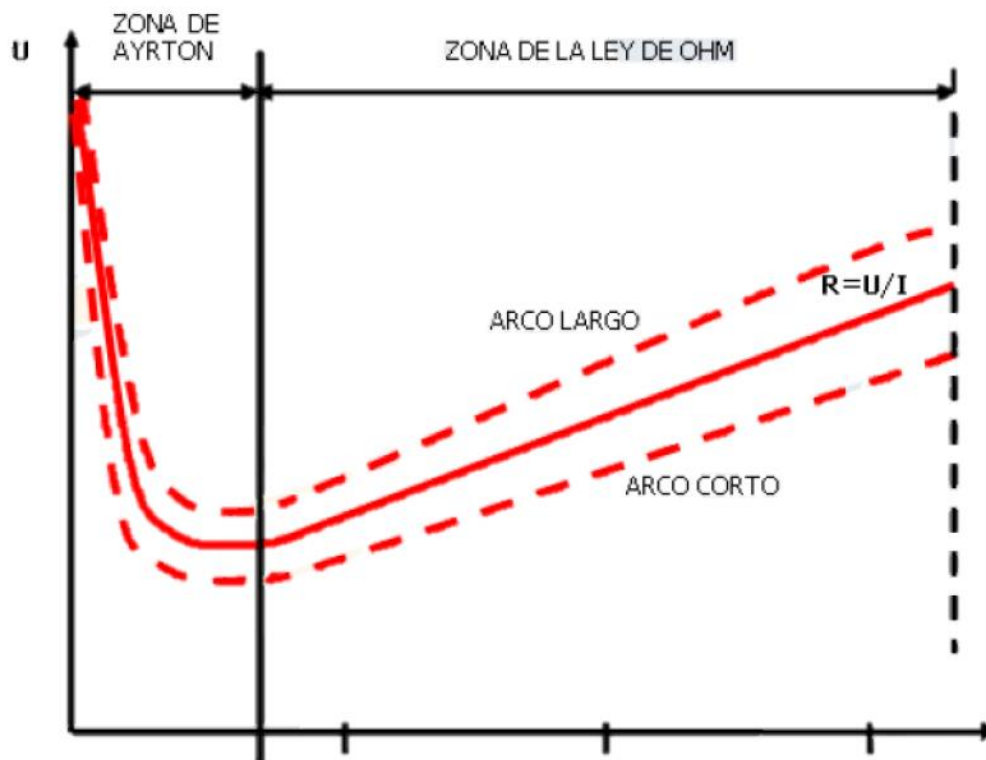


Figura 1-1. Curva característica del arco [3]

- **Zona de Ayrton.** En esta región la tensión se incrementa conforme se disminuye la intensidad y se produce cuando se trabaja con intensidades inferiores a los 15 A. Normalmente no se trabaja en esta zona para realizar el proceso de soldeo.
- **Zona de cumplimiento de la ley de Ohm.** En esta zona existe una relación lineal entre tensión e intensidad. Se suele trabajar en esta zona para generar los arcos empleados en el soldeo.

1.2.2.1 Tipos de arcos

Al margen de las características ya mencionadas de los arcos eléctricos, éstos también se pueden dividir en dos tipos dependiendo de si solo transportan la energía eléctrica o si también aportan material a la unión:

- **Arcos sin transferencia de masa.** En este tipo de arcos solamente existe movimiento de los electrones y los cationes, dirigiéndose de cátodo a ánodo los primeros y en sentido contrario los segundos. El proceso de soldeo más característico que emplea este tipo de arco es el **soldeo TIG**, que estudiaremos en profundidad en el subcapítulo 2.
- **Arcos con transferencia de masa.** En estos casos, además del movimiento de los electrones y los cationes, existirá un transporte de masa desde el electrodo hasta el metal base. Este material podrá ser escoria para los procesos de soldeo con electrodo revestido, o con alambre tubular y relleno de fundente, y también podrá ser material de aporte en los casos de **soldeo por MIG/MAG**, que se describirán brevemente a continuación.

1.2.2.2 Soldeo MIG/MAG

El proceso MIG (también conocido como GMAW) es básicamente un proceso de soldeo mediante arco eléctrico alimentado con corriente continua y con polaridad directa, y que utiliza un electrodo consumible desde el cual se añade el material de aportación. En este proceso tanto el metal de aportación como el base están protegidos de la atmósfera mediante gases de protección, que normalmente suelen estar compuestos por bióxido de carbono, por mezclas de bióxido de carbono y argón, o bien por gases con base de helio. Existe tanto uno manual como uno automático para realizar este proceso, en el manual se emplea una pistola movida a mano, mientras que en el automático la cabeza es movida mediante motores, y se utiliza sobre sobre todo para la soldadura en posición plana.

La transferencia de metal de aporte en este proceso se puede realizar a través de dos métodos distintos, como puede observarse en la figura 1-2.

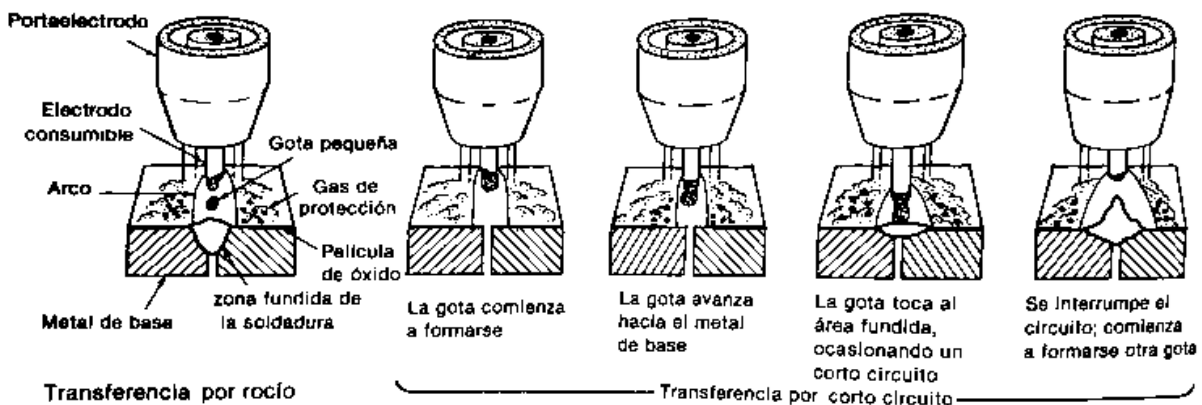


Figura 1-2. Métodos de transferencia del metal de aportación en el soldeo MIG [4]

- **Método del arco de rocío.** Se precipitan en la unión soldada cientos de gotas de material de aporte por segundo. Dichas gotas saltan unas detrás de otras, pero no estarán interconectadas, y su diámetro será menor o igual al del alambre.
- **Método del cortocircuito.** En este proceso se produce la transferencia de metal en el momento en que el electrodo entra en contacto con el material base. En el momento en que esto ocurre se forma un cortocircuito y desaparece el arco hasta que se desprende la gota, cuando se reestablece el arco eléctrico.

1.2.3 Soldeo por láser

En las últimas décadas ha aumentado exponencialmente el uso del soldeo por láser, que ha pasado de ser un procedimiento en proceso de investigación a estar completamente implantado. La industria automovilística es la que más ha aprovechado el desarrollo de esta tecnología durante los últimos años, aprovechándose de las múltiples ventajas que presenta [5]:

- El láser como luz no tiene inercia, lo que favorece arranques y paradas rápidos.
- Aportación térmica más localizada (alta densidad de energía).
- Se puede utilizar a su máximo potencial a presión atmosférica.
- Puede utilizarse en el soldeo de materiales “difíciles” (i.e. cuarzo o titanio).
- No es necesario el uso de electrodos. El material de aporte es opcional.
- Proporciona cordones estrechos y profundos.
- Menos extensión de la zona afectada por el calor (HAZ).

- Menor deformación. Proporciona uniones de alta precisión.
- Mayor velocidad de soldadura.

Su principal desventaja reside en el difícil posicionamiento y alineación de las piezas que se desea unir, debido a que el diámetro del haz láser tiene unas dimensiones de entorno a los 100-1.000 μm . Este defecto desaparece con el uso de procesos híbridos, que consiste en combinar la soldadura láser con el soldeo MIG. De esta forma se facilita de forma notable la preparación de los bordes de la unión, gracias al uso de alambre en los procesos de soldadura MIG.

En cuanto al proceso de soldeo, en la figura 1-3 podemos ver el cabezal de soldeo de un láser de CO_2 de alta potencia. En él, el haz de láser procedente del resonador se dirige hacia la pieza a soldar a través de espejos, utilizados en lugar de las lentes ópticas usadas en procedimientos de corte de baja potencia porque son mucho más fáciles de enfriar que estas últimas. Una vez el rayo láser entra en contacto con la pieza de trabajo, funde el metal base gracias al calor generado y conforma el cordón de soldadura. Todo esto se realiza a la vez que el gas de protección realiza su función, que, en el caso de soldadura por láser, además de proteger de la atmósfera el baño de fusión y la ZAT, también aumenta la velocidad de soldadura y mejora las propiedades mecánicas del conjunto.

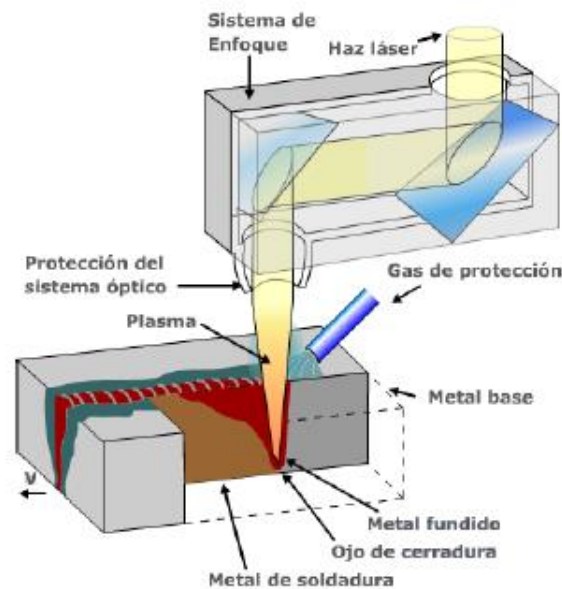


Figura 1-3. Montaje típico de soldeo por láser [6]

2 SOLDADURA TIG

El soldeo TIG (Tungsten Inert Gas), es el proceso de soldeo por arco más utilizado debido a su sencillez y versatilidad. En él, como fuente de energía se usa el arco eléctrico formado entre el electrodo utilizado y la pieza a soldar, mientras que un gas inerte protege al baño de fusión.

Este procedimiento de soldeo es usado para la mayoría de materiales, incluidos el aluminio y el magnesio y los materiales sensibles a la oxidación como el titanio, circonio y sus aleaciones. Además, es un proceso usado para soldaduras que requieren de una elevada responsabilidad, como ocurre en la industria del petróleo, química, petroquímica, alimentación, generación de energía, nuclear y aeroespacial.

Sin embargo, al tener una tasa de deposición baja, no resulta muy rentable usarse en materiales de espesores mayores de 6-8 mm. Casos estos en los que la soldadura TIG se utiliza solamente para llevar a cabo la pasada raíz, empleándose para el resto de pasadas procesos de soldeo más económicos. En la figura 2-1 podremos observar los elementos que componen el proceso de soldeo TIG.

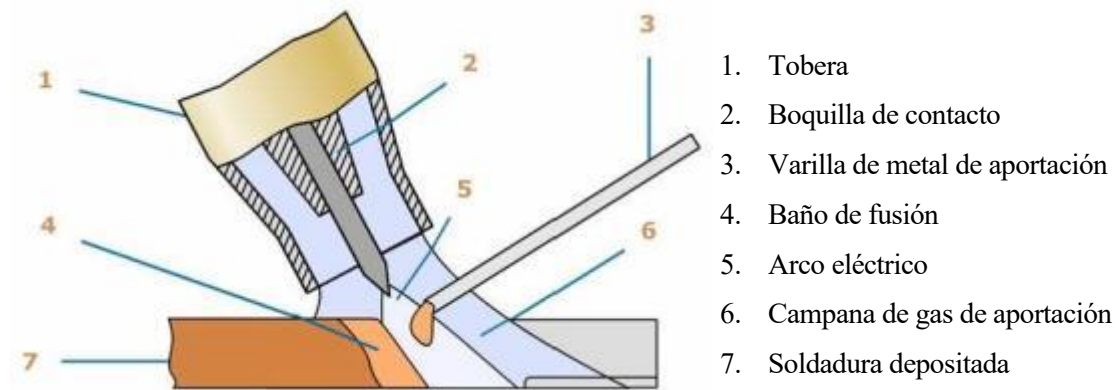


Figura 2-1. Componentes en el proceso TIG [6]

2.1 Equipo de soldeo

En la figura 2-1 podremos observar el equipo básico de soldeo mediante TIG. Consiste en una fuente de energía, un soplete, electrodo, cables de soldeo, botella de gas inerte y mangueras para la conducción del gas.

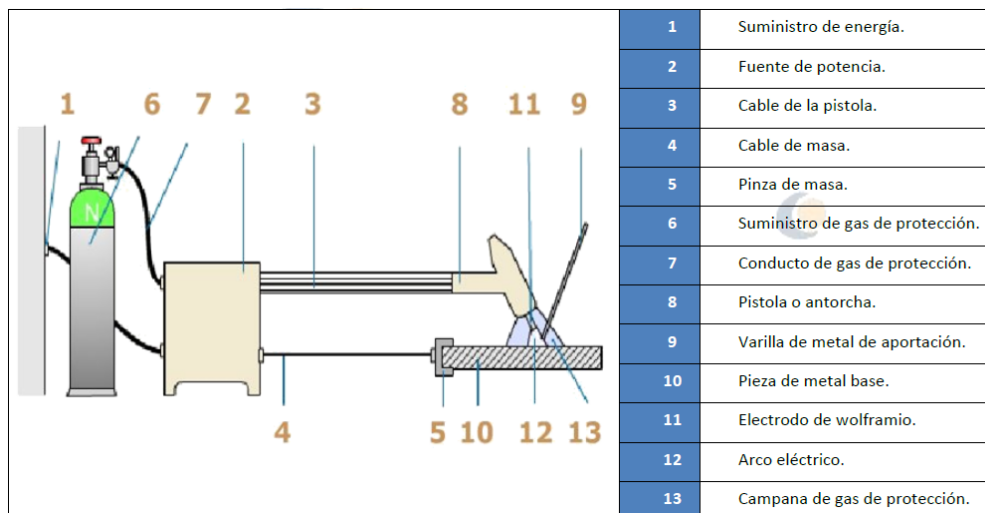


Figura 2-2. Instalación típica para soldadura TIG [7]

2.1.1 Fuentes de energía

La fuente de energía deberá poseer un rango de variación continua de intensidad de corriente y una intensidad mínima de entre 5 a 8 A. Además de poder suministrar la intensidad requerida por el material a soldar y por los espesores de los mismos.

Para el soldeo TIG se podrá emplear tanto corriente alterna como corriente continua. Dependiendo del material que se vaya a soldar se escogerá una u otra puesto que proporcionan resultados distintos. Por lo tanto, podremos tener tanto fuentes de corriente continua como de corriente alterna, que estarán compuestas por los siguientes componentes:

2.1.1.1 Fuentes de corriente continua

Este tipo de fuentes de alimentación constarán de las siguientes partes [7]:

- **Transformador:** Acondiciona la corriente procedente de la red para adecuarla al proceso de soldeo, reduciendo la tensión de la red y aumentando la intensidad.
- **Rectificador:** Convierte la corriente alterna que sale del transformador en corriente continua.
- **Ventilador:** Evita daños por sobrecalentamiento en el rectificador y en el transformador.
- **Controlador del agua de refrigeración:** Controla la presión del agua de refrigeración.
- **Válvula magnética del gas de soldeo:** Apertura y cierre del gas de protección mediante medios electromagnéticos.
- **Módulos de control:** Controla tanto la corriente de soldeo como el gas de protección.

2.1.1.2 Fuentes de corriente alterna

Las fuentes de corriente alterna constarán de las siguientes partes [7]:

- **Transformador:** Misma función que en las fuentes de corriente continua.
- **Generador de impulsos de alta frecuencia:** Ceba el arco a través de impulsos de alta frecuencia.
- **Protector:** Protege al transformador de los impulsos de alta frecuencia.
- **Filtro capacitivo:** Compensa la diferencia entre las dos mitades de cada onda que pueden provocarse durante el soldeo.
- **Válvula magnética del gas de soldeo:** Misma función que en las fuentes de corriente continua.
- **Módulos de control:** Misma función que en las fuentes de corriente continua.

2.1.2 Sopletes

Los sopletes se emplean para conducir tanto la corriente como los gases de protección hasta las zonas de soldeo. Pueden ser de dos tipos dependiendo del tipo de refrigeración que empleen:

- De refrigeración natural (por aire)
- De refrigeración forzada (mediante circulación de agua).

Los sopletes con refrigeración natural normalmente se utilizan para soldar espesores finos, que no necesiten grandes intensidades de trabajo, mientras que los de refrigeración forzada suelen usarse para trabajos que necesiten de intensidades superiores a los 150-200 A.

El electrodo de tungsteno, que transporta la corriente eléctrica hasta la pieza a soldar, es sujetado mediante unas pinzas situadas en el cuerpo del soplete. Las pinzas pueden ser de distintos tamaños dependiendo del diámetro del electrodo, debiendo estar ambos bien sujetos para que haya buen contacto eléctrico. El electrodo

deberá estar perfectamente centrado dentro de la tobera para que el chorro de gas inerte salga de una manera adecuada para proteger el baño de fusión.

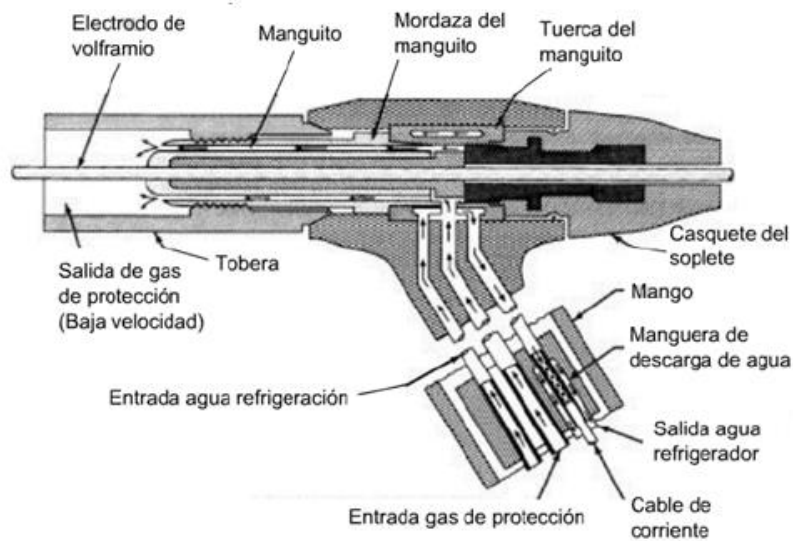


Figura 2-3. Portaelectrodo con refrigeración por agua [7]

2.2 Parámetros del proceso

Para asegurar la calidad de la soldadura es necesario hacer una buena selección de una serie de parámetros, estos son:

- Selección del tipo de electrodo.
- Selección del tipo de corriente.
- Intensidad de soldeo.
- Material de aportación.
- Gases de protección.
- Velocidad de soldeo.

2.2.1 Electroodos

En la soldadura TIG, la función del electrodo es solamente la de mantener el arco eléctrico, sin depositar material de aportación, por eso se dice que son electrodos no consumibles. La característica más importante del electrodo será la de poseer una elevada temperatura de fusión para evitar su desgaste, ya que el arco eléctrico provocará temperaturas muy elevadas en el electrodo. Por esta razón también el electrodo suele conectarse al polo negativo cuando se emplea corriente continua, ya que de esta forma el calor generado en el extremo es menor.

2.2.1.1 Tipos de electrodos

En un principio los electrodos se fabricaban de tungsteno puro, pero se comprobó que al añadirle ciertos metales se podía mejorar la emisividad, empleándose actualmente tres tipos de electrodos:

- **De tungsteno puro:** Poseen una temperatura de fusión de unos 3.400 °C. Se suelen emplear con corriente alterna para el soldeo del aluminio y de sus aleaciones.
- **De tungsteno aleado con torio:** Poseen una temperatura de fusión de unos 4.000 °C. Se utilizan en el

soldeo de corriente continua de aceros al carbono, de baja aleación, inoxidable, cobre, titanio, etc.

- **De tungsteno aleado con circonio:** Poseen una temperatura de fusión de unos 3.800 °C. Se utiliza para el soldeo de materiales ligeros como el aluminio y el magnesio.

2.2.1.2 Diámetro del electrodo

Del diámetro del electrodo que escojamos dependerá la intensidad máxima y mínima que podamos emplear. Puesto que si empleamos una intensidad demasiado grande para un diámetro dado se originará un arco inestable, mientras que, si usamos una intensidad demasiado alta para el diámetro escogido, se podrá provocar la erosión y fusión de la punta del electrodo, lo que provocaría también la aparición de inclusiones de tungsteno en el material soldado. En la tabla 2.1 podremos ver los diámetros de electrodo más utilizados, así como los correspondientes a las toberas.

Tabla 2-1. Diámetros más típicos de electrodos y sus correspondientes toberas [7]

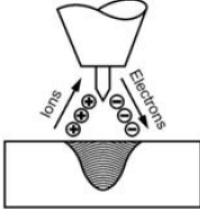
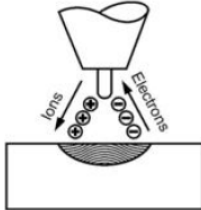
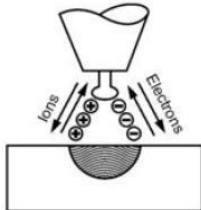



Diámetro del electrodo	Diámetro interior de la tobera
1,6	10
2,4	12
3,2	12
4	12
4,8	16
6,4	19-20

2.2.2 Tipos de corriente

En el proceso TIG se permite usar indistintamente tanto corriente continua como corriente alterna dependiendo del metal a soldar, ya que se obtendrán distintos resultados dependiendo de cuál sea la utilizada.

A partir de la tabla 2.2 podremos ver cómo afecta el tipo de corriente utilizada al resultado final de la soldadura.

Tabla 2-2. Resultado del soldeo según la corriente usada [7]

Tipo de corriente	Corriente continua polaridad directa	Corriente continua polaridad inversa	Corriente alterna
Flujo de electrones e iones			
Aspecto de la penetración			

Acción de decapantes	No	Si	Durante el semiciclo positivo
Balance térmico aproximado	70% en la pieza y 30% en la punta del electrodo	30% en la pieza y 70% en la punta del electrodo	50% en la pieza y 50% en la punta del electrodo
Descripción de la penetración	Profunda y estrecha	Ancha y no muy profunda	Media
Preparación de afilado del electrodo	Si	No	No

2.2.2.1 Arco de corriente continua

El mejor rendimiento térmico se obtiene cuando se utiliza la polaridad directa, ya que, al conectarse la pieza al polo positivo, es ésta la que concentra fundamentalmente la energía del arco, provocando que el electrodo pueda soportar intensidades de hasta 8 veces mayores que cuando se usa la polaridad inversa, además de conseguir una mejor penetración y posibilitar una velocidad de soldeo más elevada.

No obstante, cuando se sueldan aleaciones ligeras de aluminio y magnesio mediante polaridad directa se forman capas de óxidos refractarios que recubren el baño e imposibilitan la soldadura. Por ello para estos metales se suele emplear la corriente continua con polaridad inversa, ya que provoca la vaporización de los óxidos, que se desplazan a los bordes del baño de fusión.

2.2.2.2 Arco de corriente alterna

La corriente alterna reúne las ventajas de ambas polaridades de continua:

- Buen comportamiento durante el semiciclo de polaridad directa.
- Efecto decapante durante el semiciclo de polaridad inversa, lo que la hace también ideal para el soldeo de aleaciones ligeras de aluminio y magnesio.

Como principales inconvenientes presenta la dificultad de cebado y la poca estabilidad del arco. Estos defectos se producen debido a que el voltaje cae a cero en cada semiciclo, provocando el apagado del arco en ese instante. Este problema se suele remediar mediante la incorporación de una fuente de alta frecuencia con un voltaje de alrededor de 1.000 V y una frecuencia del orden de MHz, que podrá ser activada continuamente o bien cuando el voltaje pase por cero, como se podrá observar en la figura 2-4.

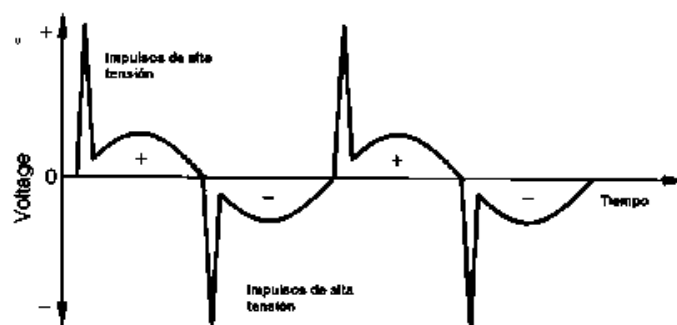


Figura 2-4. Corriente alterna con impulsos de alta frecuencia [7]

2.2.2.3 Elección del tipo de corriente en función del material

Para elegir qué tipo de corriente utilizar será fundamental conocer tanto el tipo de material como el espesor del

metal base. En la tabla 2.3 podremos observar el tipo de corriente que es recomendable usar dependiendo de estos parámetros dividiendo la conveniencia o no del uso de cada tipo de corriente en tres categorías en función de la calidad final de la soldadura.

Tabla 2-3. Selección del tipo de corriente para distintos materiales [7]

Metal a soldar	Corriente continua polaridad directa	Corriente continua polaridad inversa	Corriente alterna
Magnesio, hasta 3 mm espesor	No recomendable	Poco recomendable	Resultados óptimos
Magnesio, espesores de 4 mm o más	No recomendable	No recomendable	Resultados óptimos
Magnesio (piezas fundidas)	No recomendable	Poco recomendable	Resultados óptimos
Aluminio	No recomendable	Poco recomendable	Resultados óptimos
Fundición de aluminio	No recomendable	No recomendable	Resultados óptimos
Acero inoxidable (hasta 1,5 mm)	Resultados óptimos	No recomendable	Poco recomendable
Acero inoxidable (1,5 mm o más)	Resultados óptimos	No recomendable	Poco recomendable
Latón	Resultados óptimos	No recomendable	Poco recomendable
Plata	Resultados óptimos	No recomendable	Poco recomendable
Hastelloy	Resultados óptimos	No recomendable	Poco recomendable
Metales placados con plata	No recomendable	No recomendable	Resultados óptimos
Recargues duros	Poco recomendable	No recomendable	Resultados óptimos
Fundición de hierro	Resultados óptimos	No recomendable	Poco recomendable
Acero suave (0,3 a 0,7 mm espesor)	Resultados óptimos	No recomendable	Poco recomendable
Acero suave (0,7 a 3 mm espesor)	Resultados óptimos	No recomendable	No recomendable
Acero duro (0,3 a 0,7 mm espesor)	Resultados óptimos	No recomendable	Poco recomendable
Acero duro (0,7 mm o más)	Resultados óptimos	No recomendable	Poco recomendable
Cobre desoxidado (hasta 2,5 mm)	Resultados óptimos	No recomendable	No recomendable
Titanio	Resultados óptimos	No recomendable	No recomendable

2.2.3 Intensidad de soldeo

Cuanto mayor sea la intensidad que empleemos, mayor será la profundidad de penetración que se consiga al realizar la soldadura. Aunque como se ha visto anteriormente, esta intensidad máxima admisible dependerá sobre todo del tipo de polaridad que hayamos empleado. De tal manera que para el soldeo con polaridad inversa se hace inviable el usar intensidades altas, ya que el punto de fusión del tungsteno es de 3.800 °C, y si se conecta al polo positivo empleando altas intensidades, su temperatura alcanzaría los 4.200 °C, provocando la fusión del mismo.

Sin embargo, si empleamos esa misma intensidad usando una polaridad directa, la temperatura apenas alcanzaría los 3.600 °C, por lo que el electrodo no se fundiría. Como ejemplo particular se puede poner un electrodo de tungsteno de 2,5 mm de diámetro, que con polaridad directa podría soportar una corriente de 200 A. Por el contrario, si empleamos un electrodo de tungsteno que posea un diámetro de 6 mm pero que sea empleado con polaridad inversa no soportaría intensidades superiores a los 120 A.

2.2.4 Material de aportación

En el caso de la soldadura TIG el material de aportación se aplica a través de una varilla que se sujeta en una posición en la que uno de sus extremos entre en contacto con el arco eléctrico. Al entrar en contacto con éste,

la varilla se funde y se precipita hacia el metal base, mezclándose ambos y creando el cordón de soldadura. Aunque cuando se sueldan piezas de espesor reducido (menor a 3 mm) el material de aporte no suele ser necesario y por lo tanto se suelda sin varilla.

Para que la soldadura no presente defectos es fundamental mantener la varilla que contiene el material de aporte libre de contaminaciones en forma de humedad, polvo o suciedad. También es muy importante que la varilla esté cubierta por el gas de protección, para ello la parte caliente de la varilla deberá estar lo suficientemente cerca del baño de fusión.

El tipo de metal de aporte utilizado deberá tener una composición química similar al metal base, esto es debido a que el proceso de soldeo mediante TIG no produce escorias, y se realiza en una atmósfera inerte que no provoca reacciones del baño. Tanto en las normas UNE como en las AWS encontraremos que material de aporte utilizar en función del material base de las piezas a soldar.

2.2.5 Gases de protección

La función del gas de protección durante cualquier proceso de soldadura realizado mediante arco eléctrico es la de desplazar el aire de la zona de soldadura para proteger al metal fundido, el baño de fusión y el electrodo, y evitar su contaminación. Los elementos que provocan la contaminación son el oxígeno, el nitrógeno y el agua, que originan óxidos y la aparición de la porosidad.

Los gases de protección más empleados en el proceso son:

- Argón.
- Helio.
- Mezcla de Argón y Helio.

Las propiedades y características a tener en cuenta en estos gases serán los siguientes:

2.2.5.1 Reactividad

Esta propiedad mide la capacidad de los gases para reaccionar con otros elementos. Es la razón por la cual se usan gases inertes como gases de protección, ya que éstos no reaccionan químicamente con ningún elemento durante el baño de fusión.

2.2.5.2 Energía de ionización

Es la energía, expresada en electrones voltio (eV), necesaria para liberar un electrón de un átomo en estado gaseoso, convirtiéndolo en un ion, o en un átomo cargado eléctricamente.

La energía necesaria para liberar un electrón de un átomo de argón es 15,759 eV mientras que en el helio es de 24,586 eV.

2.2.5.3 Relación entre voltaje e intensidad del Arco

Una vez el gas sea ionizado, se obtendrán los electrones libres necesarios para soportar el arco eléctrico entre el electrodo y el metal base. Para soportar este arco será necesario mantener los niveles de energía correspondientes al gas empleado.

Como podremos observar en la figura 2-4, para una misma longitud de arco, para el helio se hace necesario un voltaje más elevado para mantener el arco que cuando se emplea argón.

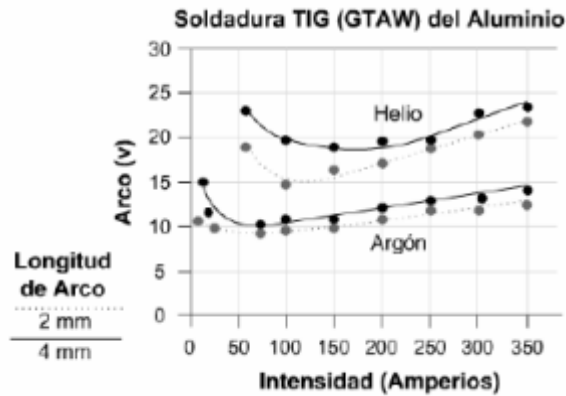


Figura 2-5. Voltaje necesario para mantener la intensidad del arco en argón y helio [6]

2.2.5.4 Relación entre el calor generado y el voltaje e intensidad del arco

Debido a que, como se explicó en el apartado 2.2.5.3, el helio requiere de un voltaje mayor que el argón para mantener la misma intensidad de corriente, el uso del helio como gas de protección generará un calor superior al argón, debido a que el calor generado es directamente proporcional a la intensidad y al voltaje producidos. Por esta razón el uso de uno u otro como gas de protección provocará cambios en la forma final del cordón.

2.2.5.5 Conductividad térmica

Esta propiedad mide la facilidad con la que el gas conduce al calor. Esto influye en la pérdida de calor durante el soldeo desde el centro hasta la periferia del arco eléctrico, lo que influye también en la forma final de la soldadura, de tal forma que en los procesos en los que se use argón como gas de protección, la penetración tendrá una forma más estrecha en la raíz y más ancha en la parte superior, debido a que tiene una conductividad térmica más baja que el helio.



Figura 2-6. Aspecto de la penetración usando helio (izquierda) y argón (derecha) [6]

2.2.5.6 Tensión superficial

En todos los líquidos existen unas fuerzas en su superficie ejercidas por las moléculas que están por debajo de la misma y que tienden a contraer el líquido y a evitar que fluya. En soldadura las fuerzas de tensión superficial afectan al metal fundido, teniendo una gran influencia en el cordón final. De esta forma, si las fuerzas de tensión superficial son elevadas, el cordón tendrá una forma convexa e irregular, mientras que si su valor es bajo el cordón tendrá baja tendencia a presentar mordeduras.

2.2.5.7 Pureza

La contaminación del gas de aportación puede tener un gran impacto perjudicial sobre el resultado final de la soldadura, afectando principalmente a los niveles de porosidad, a la apariencia del cordón y a velocidad de la soldadura. Estos efectos, sin embargo, también dependerán del tipo de material que se vaya a soldar,

provocando un mayor efecto en materiales como el titanio y un menor impacto en otros como el acero al carbono¹.

2.2.6 Velocidad de soldeo

La velocidad de soldeo afecta principalmente a la anchura de la penetración, aunque también condiciona en menor medida la profundidad de la misma. Este parámetro deberá adaptarse a los requisitos de calidad necesarios. También tendrá un gran peso a la hora de elevar el rendimiento económico del proceso, sobre todo en el soldeo automático.

2.3 Técnicas operativas

2.3.1 Preparación de la unión

El diseño de la unión deberá asegurar una accesibilidad adecuada, permitiendo que el material de aporte y el gas de protección lleguen a la zona inferior de la unión. La elección de la geometría dependerá del tipo del material base y su espesor. También será fundamental realizar una adecuada limpieza del material base del de aportación, eliminando los restos de aceite, grasa, pintura, etc.

2.3.2 Proceso TIG manual

A partir de la figura 2-6 podremos apreciar la técnica y las etapas empleadas a la hora de aplicar el proceso de soldeo mediante TIG manual.

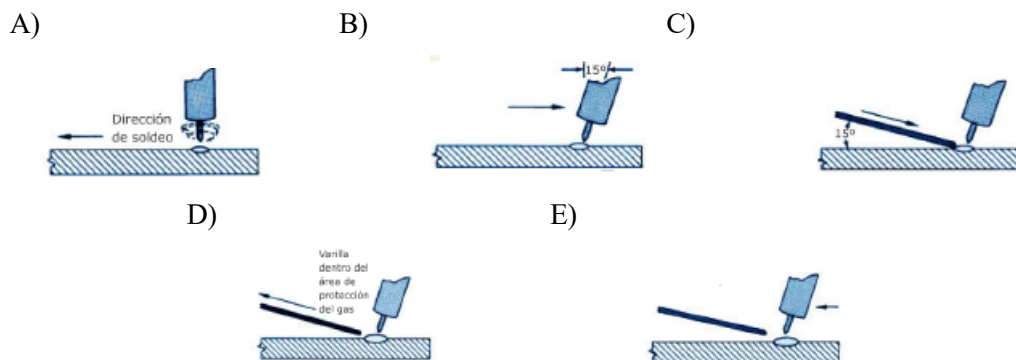


Figura 2-7. Técnica para realizar el soldeo TIG manual [7]

- A. Formación del baño de fusión, mediante un movimiento circular o de lado a lado.
- B. Desplazamiento del electrodo hacia el borde del baño de fusión.
- C. Adición de metal de aportación en el borde del baño de fusión.
- D. Movimiento continuo de la varilla a medida que se funde.
- E. Movimiento del electrodo siguiendo el borde del baño de fusión.

2.3.3 TIG con arco pulsado

Este procedimiento es una variante del proceso TIG que consiste en la aplicación de una corriente pulsada para realizar el soldeo, de forma que se consigue un mayor control sobre el aporte de calor al metal base y una

¹ Clasificación de los metales según su tolerancia a los contaminantes en ppm, ordenados de menor a mayor:

- Aceros al carbono y cobre.
- Aceros inoxidable.
- Aluminio y magnesio.
- Titanio.

mejor calidad de soldadura.

La corriente de soldadura varía entre un nivel mínimo (corriente de fondo) y un nivel máximo (impulso), tal y como se ve en la figura 2-7. Con cada uno de los impulsos se producen una serie de puntos, que se solapan hasta formar un cordón continuo. Este proceso se utiliza principalmente en aquellos casos en los que sea importante limitar la aportación de calor, tanto por razones de tipo metalúrgicas como en el caso de soldar láminas muy finas.

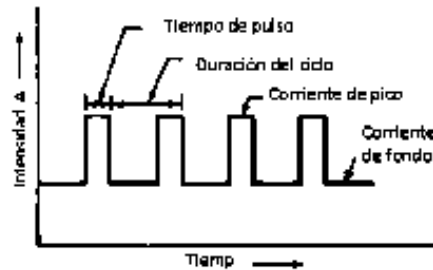


Figura 2-8. Ciclo de corriente en el soldeo por arco pulsado [7]

2.3.4 Soldeo orbital

Este proceso de soldeo es utilizado mayoritariamente para el soldeo automático de tubos. En él, se hace girar automáticamente al electrodo alrededor de la unión circunferencial. Utilizan controles de corriente y velocidad para poder adaptarse a las distintas posiciones de unión circunferencial que se puedan presentar. En la figura 2-8 podemos ver un ejemplo en el que se utilizaría soldeo orbital, con un tubo atravesando a otro tubo o a una chapa.

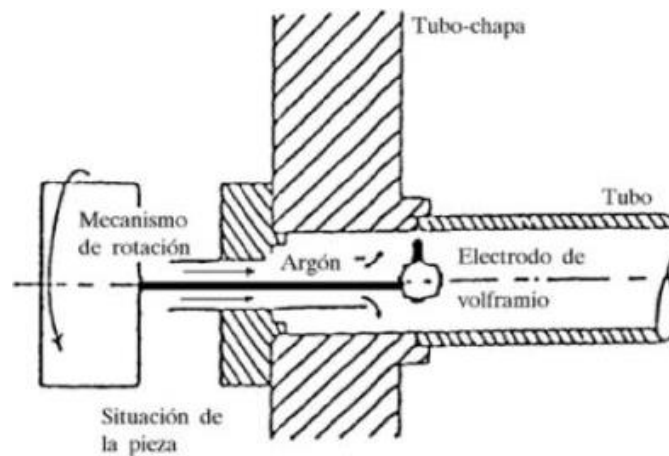


Figura 2-9. Ejemplo de empleo de soldeo orbital [7]

2.4 Ventajas e inconvenientes del proceso

Ventajas:

- Proceso adecuado para unir la mayoría de los metales.
- Arco estable y concentrado.
- Aunque se trata de un proceso esencialmente manual, se ha automatizado para algunas fabricaciones en serie, como tubería de pequeño espesor, soldada longitudinal o helicoidalmente y para la fijación de tubos a placas en intercambiadores de calor.

- No se producen proyecciones (al no existir transporte de metal en el arco).
- No se produce escoria.
- Produce soldaduras lisas y regulares.
- Se puede utilizar con o sin metal de aporte, en función de la aplicación.
- Puede emplearse en todo tipo de uniones y posiciones.
- Alta velocidad de soldeo en espesores por debajo de 3 – 4 mm.
- Se pueden conseguir soldaduras de gran calidad.
- Permite un control excelente de la penetración en la pasada de raíz.
- No requiere el empleo de fuentes de energía excesivamente caras.
- Permite el control independiente de la fuente de energía y del metal de aportación.
- No produce humos.

Inconvenientes:

- La tasa de deposición es menor que la que se puede conseguir con otros procesos de soldeo por arco.
- Su aplicación manual exige, en general, gran habilidad por parte del soldador.
- No resulta económico para espesores mayores de 10 mm.
- En presencia de corrientes de aire puede resultar difícil conseguir una protección adecuada de la zona de soldadura.
- Mayor cantidad de radiación ultravioleta que en otros procesos, lo que requiere protección adecuada.

3 TITANIO. ALEACIONES, PROPIEDADES Y APLICACIONES AERONÁUTICAS

El titanio es un metal que se caracteriza por poseer una combinación de propiedades únicas: densidad moderada, resistencia elevada y excelente comportamiento ante la corrosión. Sin embargo, a pesar de ser el cuarto elemento más abundante del planeta, su producción resulta muy costosa, debido a su reactividad y a su elevado punto de fusión. Las principales razones por las que es un material tan utilizado en la industria aeronáutica son las siguientes:

- **Reducción de peso:** Debido al alto cociente peso-resistencia de las aleaciones de titanio, éstas se han empleado para sustituir al acero en aleaciones que requieran una alta resistencia a la fractura, aunque este último tenga valores de resistencia ligeramente mejores a los del titanio. Con una densidad de $4,54 \text{ g/cm}^3$, el titanio es aproximadamente la mitad de pesado que las aleaciones de acero y las superaleaciones de níquel.
- **Resistencia a la fatiga:** Las aleaciones de titanio tienen mucha mejor resistencia a la fatiga que las aleaciones de aluminio por lo que se suele utilizar en los mamparos de presión y en los marcos de los aviones militares.
- **Buen comportamiento a temperaturas elevadas de trabajo:** El titanio suele sustituir al aluminio en aplicaciones donde la temperatura de trabajo excede los $130 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura a partir de la cual disminuyen considerablemente las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio. A partir de temperaturas superiores a los $500\text{-}600 \text{ }^\circ\text{C}$ el titanio rápidamente se reblandece, se deforma y se oxida, por lo que es sustituido principalmente por las superaleaciones de níquel. Estas condiciones de trabajo adecuadas para el titanio, de entre 130 a $600 \text{ }^\circ\text{C}$ se dan, por ejemplo, en las góndolas de los motores, en la unidad generadora auxiliar (APU) o en los sistemas antihielo.
- **Resistencia a la corrosión:** La resistencia a la corrosión de las aleaciones de titanio es superior tanto a las aleaciones de aluminio como al acero. Esto les permite no necesitar ningún tipo de recubrimiento para hacer frente a ambientes corrosivos como los que se dan en los suelos de la cocina o los baños del avión.
- **Reducción de espacio:** Un buen ejemplo sobre el uso del titanio debido a restricciones de volumen lo encontramos en las vigas del tren de aterrizaje del Boeing 747 o el Boeing 757. El material ideal para llevar a cabo esta función sería la aleación de aluminio 7075, mucho más económica que cualquier aleación de titanio, sin embargo, para cargar con las cargas requeridas, las vigas deberían tener unas dimensiones que le impedirían encajar con las alas del avión. Otra opción sería usar acero, pero nuevamente nos encontramos con el problema de su elevada densidad en comparación con el titanio.

El uso del titanio en la estructura de los aviones comerciales de grandes dimensiones se ha incrementado desde un 3-5% de su peso en los años 80 hasta el 9% en aviones como el A380 o el 10% en el B777. No obstante, es en los aviones militares donde ha sido mayor el incremento del porcentaje de titanio utilizado respecto al peso total de la estructura del avión. Esto es debido a que estos aviones deben soportar las cargas extremas que se producen durante las maniobras de combate. De esta forma, los aviones de combate F-14 o F-15 presentan un porcentaje en peso de titanio sobre su masa total de un 26%, empleándose en aplicaciones que van desde las estructuras de las alas, partes del tren de aterrizaje o la estructura del fuselaje hasta remaches o tubos hidráulicos.

3.1 Fases del titanio

El titanio puro se caracteriza por poseer dos formas alotrópicas diferentes en función de la temperatura a la que se encuentre:

- Una fase α , hasta $892 \text{ }^\circ\text{C}$ (1.620 F en figura 3-1), de estructura cristalina hexagonal compacta.

- Otra fase β , por encima de 892 °C, con una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo.

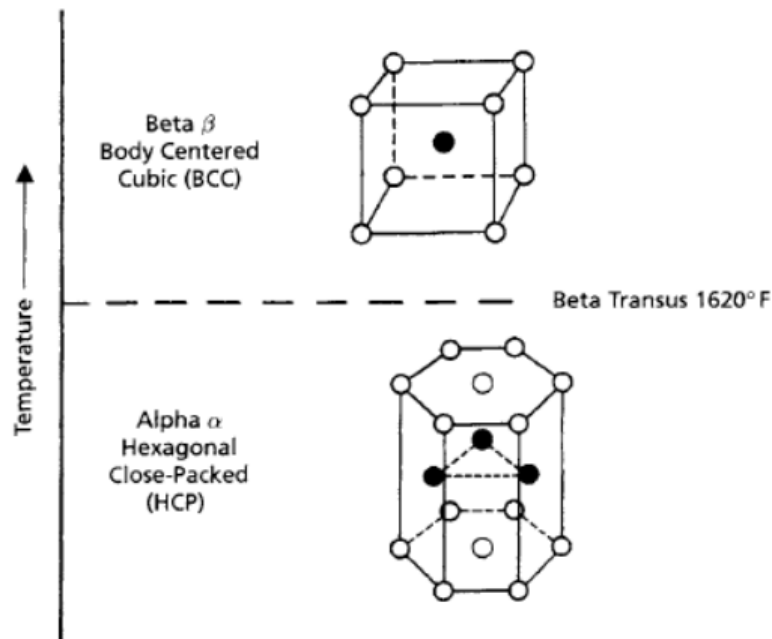


Figura 3-1. Estructuras del titanio [27]

A diferencia de otros materiales utilizados en aeronáutica, como las aleaciones de aluminio, magnesio o níquel, que siempre presentan la misma estructura cristalina a temperatura ambiente, las aleaciones de titanio pueden presentar estas dos estructuras diferentes a 20°C gracias a elementos aleantes que provocan que disminuya la temperatura de transición, es decir, la temperatura a la cual la fase alfa se transforma en fase beta o viceversa. La composición química de estas dos fases es idéntica, pero al tener distintas estructuras poseen propiedades diferentes, proporcionando por consiguiente que se utilicen en aplicaciones diferentes dentro de la aeronáutica. De esta forma, la estructura cristalina hexagonal compacta propia de la fase α se caracteriza por dotar a la aleación de niveles medios de dureza, excelente resistencia al creep a elevadas temperaturas y buenos valores de ductilidad y soldabilidad, lo que la hace ideal para aplicaciones relacionadas con los motores de las aeronaves, mientras que la estructura cúbica centrada en el cuerpo, propia de la fase β , suele provocar en el material elevada dureza, alta resistencia a la fatiga, escasa ductilidad y buena resistencia al creep a temperaturas intermedias, lo que provoca su uso en aplicaciones que requieran soportar cargas muy pesadas.

Como ya se ha mencionado, hay ciertos elementos que se emplean para estabilizar las fases alfa o beta. La habilidad de estos elementos para modificar la temperatura a la que estas fases son estables depende del número de elecciones de valencia, número que cuantifica el número de electrones existentes en la capa más externa del átomo. El titanio puede tener 2, 3 o 4 electrones de valencia, y cualquier elemento con un diferente número de electrones de valencia puede facilitar la formación de la fase α o la fase β . Los elementos que poseen un número de valencia inferior al del titanio favorecen la formación de la fase α , y son los llamados estabilizadores α . Entre ellos podemos incluir al aluminio, al carbono, al nitrógeno y al oxígeno. Por otra parte, los elementos que poseen un número de valencia superior al del titanio provocan que disminuya la temperatura a la cual la fase α se transforma en fase β . Éstos son los llamados estabilizadores β , que se encuentran a su vez subdivididos entre aquellos que tienen una muy elevada solubilidad en el titanio, llamados elementos isomorfos, y, los que solamente presentan una solubilización limitada, llamados eutéctoides. Entre los estabilizadores β isomorfos podemos incluir al vanadio, al molibdeno, al niobio y al tántalo, mientras que en los elementos eutéctoides destacamos al magnesio, cromo, silicio, hierro, cobalto, níquel y cobre. Finalmente, también habría que destacar a los elementos llamados neutros, que, debido a que tienen el mismo número de valencia que el titanio, no modifican la temperatura de transformación de α a β , pero contribuyen a un endurecimiento por solución sólida. Entre éstos, los más importantes son el estaño y el circonio.

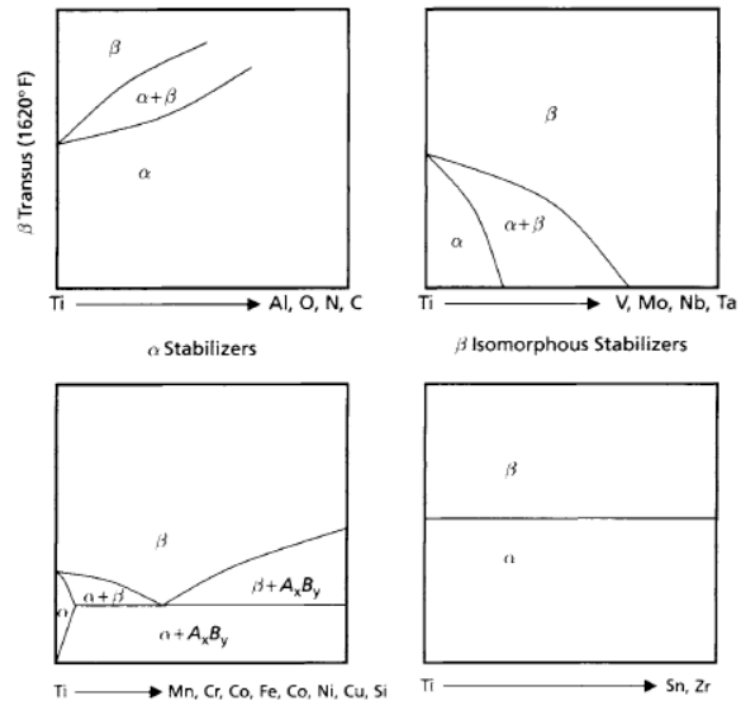


Figura 3.2. Diagrama de fases del titanio [25]

En la figura 3.2 podemos ver los distintos diagramas de fase del titanio dependiendo de los elementos aleantes que lo conformen. Las aleaciones de titanio se clasifican según las estructuras de alfa y beta contenidas en la aleación. De esta forma, nos encontraríamos con aleaciones alfa, cercanas a alfa, aleaciones alfa-beta y aleaciones beta. Como su propio nombre indica, las aleaciones alfa no contienen a la fase beta a temperatura ambiente, mientras que las aleaciones cercanas a alfa contienen solamente una pequeña cantidad de la fase beta. Por otra parte, las aleaciones alfa-beta contienen ambas fases, y las aleaciones beta están compuestas mayormente por la fase beta, aunque con pequeñas cantidades de la fase alfa.

Las aleaciones alfa y cercanas a alfa, normalmente tienen al aluminio como principal aleante, con unas cantidades del mismo que suelen oscilar entre el 5-6 %, y se le suelen añadir también elementos neutros como el estaño y el circonio. En cuanto a las propiedades que les aporta los elementos aleantes, el aluminio le proporciona una mejor resistencia a la oxidación, mientras que la adición de silicio mejora su resistencia al creep.

3.2 Aleaciones de titanio

Como se comentó anteriormente, el titanio tiene la particularidad de poseer dos distintas estructuras cristalinas dependiendo de la temperatura a la que se encuentre. Dichas estructuras presentan diferentes propiedades que las hacen más o menos adecuadas para según que aplicaciones, de tal forma que se usan distintos materiales aleantes dependiendo de si buscamos una aleación de carácter alfa o beta. Los estabilizadores de la fase α extienden dicha fase hasta temperaturas más elevadas, mientras que los de la fase β disminuyen la temperatura a la que se pasa de la fase α a la fase β . En este apartado veremos las aleaciones más importantes, sus propiedades y sus aplicaciones en la aeronáutica.

3.2.1 Clasificación de las aleaciones de titanio

En el documento UNE-CEN ISO/TR 15608IN se establece un sistema uniforme de agrupamiento de materiales cuyo propósito es el soldeo. El sistema de agrupamiento establecido para las aleaciones de titanio es el siguiente.

Tabla 3-1. Clasificación de aleaciones de titanio [9]

Grupo	Subgrupo	Tipo de titanio o aleación de titanio
		Titanio puro
	51.1	Titanio con $02 < 0,20\%$
51	51.2	Titanio con $0,20\% < 02 \leq 0,25\%$
	51.3	Titanio con $0,25\% < 02 \leq 0,35\%$
	51.4	Titanio con $0,35\% < 02 \leq 0,40\%$
52		Aleaciones alfa (a)
53		Aleaciones alfa-beta (b)
54		Aleaciones próximas a beta y beta (c)

a Las aleaciones cubiertas por el grupo 52 son: Ti-0.2Pd; Ti-2,5Cu; Ti-5Al-2,5Sn; Ti-8Al-1Mo-1V; Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo; Ti-6Al-2Nb- 1Ta-0.8Mo.

b Las aleaciones cubiertas por el grupo 53 son: Ti-3Al-2.5V; Ti-6Al-4V; Ti-6Al-6V-2Sn; Ti-7Al-4Mo.

c Las aleaciones cubiertas por el grupo 54 son: Ti-10V-2Fe-3Al; Ti-13V-11Cr-3Al; Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn; Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo.

3.2.2 Titanio comercialmente puro

Conseguir titanio puro presenta grandes dificultades debido a su reactividad, por ello a nivel industrial se realiza la distinción de comercialmente puro y se clasifica en diferentes grados dependiendo del nivel de impurezas que presenten. El titanio comercialmente puro contiene pequeñas cantidades de elementos intersticiales de nitrógeno, oxígeno y carbono y se divide en cuatro grados, diferenciándose cada uno de ellos por el contenido en oxígeno, que aumenta del grado 1 al 4.

Tabla 3-2. Propiedades mecánicas y composición del titanio comercialmente puro [10]

Material	σ	Límite elástico	Límite de impurezas, % en peso máximo				
	Mpa	Mpa	N	C	H	Fe	O
ATSM grado 1	240	170	0,03	0,08	0,015	0,2	0,18
ATSM grado 2	340	280	0,03	0,08	0,015	0,3	0,25
ATSM grado 3	450	380	0,05	0,08	0,015	0,3	0,35
ATSM grado 4	550	480	0,05	0,08	0,015	0,5	0,4

El titanio grado 1 presenta la resistencia más baja debido a sus bajos niveles en hierro y oxígeno, elementos que hacen aumentar la dureza del material. Esto se debe a que el oxígeno actúa como un elemento intersticial manteniendo la estructura hexagonal compacta del Ti fase α , mientras que el hierro actúa como un refinador de grano de la fase β , incrementando así su dureza. No obstante, este tipo de titanio presenta la ductilidad más elevada de los titanios comerciales, lo que le proporciona una muy buena formabilidad en frío.

El Ti cp grado 2 posee una buena combinación entre resistencia y ductilidad, razón por la cual es el más frecuentemente seleccionado para aplicaciones industriales. Su nivel de resistencia es bastante similar a los aceros inoxidable más comerciales y su buena ductilidad le confiere buena formabilidad en frío.

El Ti cp grado 3 posee una resistencia ligeramente mayor a los dos grados anteriores debido al mayor contenido de elementos residuales, principalmente oxígeno y nitrógeno, y una ductilidad ligeramente más baja.

El Ti grado 4 tienen la más alta resistencia de los grados comerciales del titanio, pero su ductilidad disminuye bastante en comparación con los otros grados comerciales de titanio puro debido a su alto contenido en oxígeno.

3.2.2.1 Aplicaciones

Debido a su extraordinaria resistencia a la corrosión y a su excelente soldabilidad, el titanio comercialmente puro se utiliza principalmente para distintas aplicaciones de tuberías. Otra característica a destacar en este tipo de material es que mantiene sus propiedades mecánicas a temperaturas de trabajo muy inferiores a la temperatura ambiente, razón por la cual es utilizado también, por ejemplo, en el almacenamiento del nitrógeno líquido en vehículos espaciales.

3.2.3 Aleaciones alfa

Dentro de las aleaciones alfa nos encontramos con el subgrupo de las aleaciones cercanas a alfa, llamadas así porque contienen pequeñas cantidades de elementos estabilizadores de la fase beta, de forma que su microestructura consistiría en pequeñas cantidades de granos β -Ti dispersos en un volumen mucho mayor de granos α -Ti. Estas aleaciones cercanas a alfa tienen una mayor resistencia a temperatura ambiente además de poseer mejor resistencia a la fluencia cuando se trabaja a temperaturas elevadas. Por esta razón las aleaciones alfa puras apenas se utilizan en la industria aeronáutica, con la única excepción de la aleación Ti-5Al-2.5Sn. En la tabla 3-5 podremos ver algunas de las aleaciones alfa más utilizadas, usando para su designación un sistema que refleja el porcentaje en peso de los principales aleantes que componen la aleación (por ejemplo, el Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo contiene un porcentaje en peso del 6% en Aluminio, del 2% en estaño, 4% en circonio y 6% en molibdeno). El sistema numérico IMI también se ha empleado para algunas aleaciones.

Tabla 3-3. Propiedades mecánicas aleaciones alfa más importantes [27]

	Material	Módulo de Young (MPa)	Límite elástico (MPa)	Carga de rotura (MPa)
Aleaciones alfa	Ti-5Al-2.5Sn (IMI317)	103	760	790
Aleaciones cercanas a alfa	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	114	862	930
	Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb (IMI829)	120	860	960
	Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb (IMI834)	120	910	1030
	Ti-2.25Al-11Sn-5Zr-1Mo (IMI679)	115	900	1000
	Ti-6Al-4Zr-2Mo (IMI685)	115	960	1030
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti-6242)	120	990	1010

Como podemos observar, el aluminio es el principal elemento aleante de las aleaciones alfa, ya que estabiliza la fase alfa y provoca un aumento de la resistencia a la tracción y a la fluencia. Sin embargo, si se le añade a la aleación más de un 9% de aluminio se pueden generar aluminuros de titanio (Ti_3Al) que pueden reducir su ductilidad y su resistencia a la fractura. Como principales características de este tipo de aleaciones destacan su buen comportamiento a altas temperaturas de hasta 550-600°C, buena soldabilidad y mediana formabilidad. También es importante destacar que este tipo de aleaciones no son endurecibles por tratamiento térmico debido a que durante su procesado no sufren ningún cambio de fase.

3.2.3.1 Aplicaciones

Las aleaciones alfa más utilizadas son Ti-6242 y IMI 834, empleadas en aplicaciones que requieran soportar altas temperaturas, como por ejemplo las paletas y discos empleados en los motores aeronáuticos, donde las temperaturas superan los 350 °C e impedirían el uso del Ti-6Al-4V por los problemas de fluencia que presentaría a tan elevadas temperaturas. Un buen ejemplo es el compresor mostrado en la figura 3.1, donde podemos ver un compresor con sus distintas etapas unidas mediante soldadura por fricción en el que las dos etapas con la temperatura de trabajo más elevada están fabricadas de Ti-6242, mientras que el resto son de Ti-6Al-4V. Otra aplicación del Ti-6242 es el rodete mostrado en la figura 3-1. Los rodetes son la última etapa de los compresores en pequeños motores aeronáuticos y en unidades de potencia auxiliares.

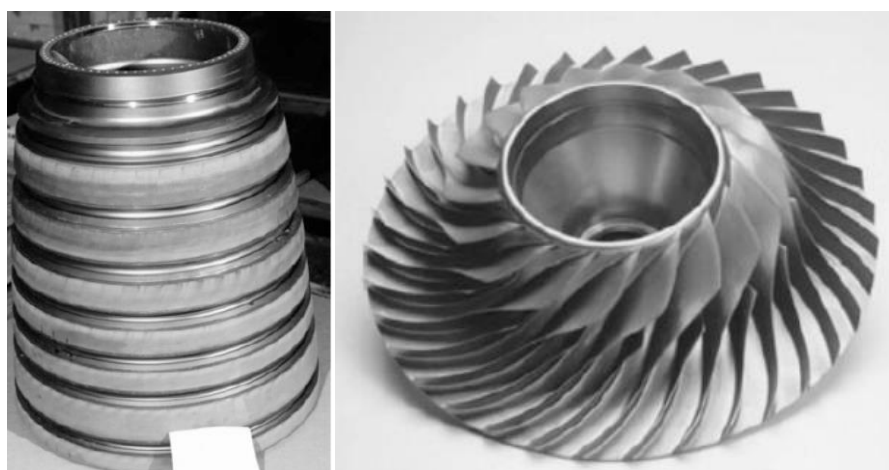


Figura 3-3. Compresor y rodete fabricados de Ti-6242 [26]

En cuanto a las aleaciones puramente alfa, la única realmente utilizada es el Ti-5Al-2.5Sn debido a su habilidad para retener la ductilidad y la resistencia a la fractura a temperaturas muy bajas, razón por la cual es empleado en aplicaciones criogénicas.

3.2.4 Aleaciones beta

Las aleaciones beta presentan en general mejores valores de resistencia a la rotura y a la fatiga que las aleaciones alfa, sin embargo, su uso es bastante reducido por su baja resistencia a la fluencia a altas temperaturas, cualidad por la que más se emplea el titanio en aplicaciones aeronáuticas. Con respecto a las aleaciones $\alpha + \beta$, las aleaciones beta presentan una mejor formabilidad en frío que éstas, y, además, son más resistentes a la corrosión, siendo especialmente empleadas en ambientes en los que exista el riesgo de una hidrogenación indeseada, ya que la estructura beta presenta una mayor tolerancia al hidrógeno que la fase alfa. Otra característica a destacar de este tipo de aleaciones es que sus propiedades mecánicas pueden ser mejoradas mediante un tratamiento térmico de maduración con bajas temperaturas y altos tiempos. Otra característica a destacar de estas aleaciones es su buena soldabilidad. En la tabla 3-6 podremos observar las aleaciones más utilizadas con sus propiedades mecánicas y alguna de sus aplicaciones.

Tabla 3-4. Propiedades mecánicas y aplicaciones de las aleaciones beta más importantes [27]

Material	Módulo de Young (MPa)	Límite elástico (MPa)	Carga de rotura (MPa)	Aplicaciones
Ti-13V-11Cr-3Al	103	1200	1280	SR-71 Blackbird
Ti-8V-6Cr-4Mo-4Zr-3Al	103	1130	1225	Elementos de sujeción
Ti-11.5Mo-6Zr-4Sn	103	1315	1390	Elementos de sujeción
Ti-10V-2Fe-3Al	103	1250	1320	Fuselaje, tren de aterrizaje, paletas de rotores de helicópteros
Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn	103	966	1000	Fuselaje
Ti-15Mo-2.7Nb-3Al-0.2Si (21S)	103	1170	1240	Góndola de los motores

3.2.4.1 Aplicaciones

La primera aleación beta usada en aplicaciones aeronáuticas fue el Ti-13V-11Cr-3Al, la cual fue utilizada en el avión militar *SR-71 Blackbird*, donde se empleó en la superficie del fuselaje y las alas, además de en alerones, mamparos, costillas y tren de aterrizaje. Este amplio uso del titanio se debe a que este avión tiene que soportar velocidades de hasta 3.200 Km/h, velocidad que, debido a la fricción con el aire, provoca temperaturas en la superficie del avión de hasta 300 °C, a las cuales el aluminio se reblandece y es sustituido por el titanio debido a su mejor resistencia a altas temperaturas.

En el Boeing 777 se usan las aleaciones beta en numerosos componentes, como en difusores, góndolas, o el tren de aterrizaje (figura 3-2a), donde la aleación Ti-10V-2Fe-3Al se emplea para reemplazar a las aleaciones de acero de alta resistencia y así evitar el riesgo de fragilidad por hidrógeno que puede aparecer en este tipo de materiales. Otra de las razones por las que se emplea esta aleación tipo beta es por su precio más económico respecto al Ti-6Al-4V en forjados, donde las elevadas temperaturas requeridas para este tipo de material aumentan su coste de manera considerable. Gracias también a su facilidad para el forjado se fabrican también para el Boeing 777 piezas de precisión como las mostradas en la figura 3-2b.



Figuras 3-4 a y b. Tren de aterrizaje y piezas de precisión empleadas en el Boeing 777 [26]

Otra aleación muy utilizada es la 21S, diseñada especialmente para presentar una gran resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas, lo que le permite soportar por largos periodos de tiempo temperaturas de hasta 480-565 °C, y en momentos puntuales temperaturas de hasta 650 °C, presentando también muy buenos valores de fluencia, incluso mejores que los del Ti-6Al-4V, a pesar de ser una aleación beta. Por estas razones es utilizada en aplicaciones como las góndolas de los motores del Boeing 777.

3.2.5 Aleaciones alfa+beta

Las aleaciones $\alpha+\beta$ son con diferencia las aleaciones de titanio más utilizada, estando entre éstas la aleación Ti-6Al-4V, la más usada de entre todas las aleaciones de titanio, empleada en todo tipo de aplicaciones y que representa alrededor del 60% del total del titanio empleado en los motores y entre el 80 y el 90% del total del titanio empleado en el fuselaje. La popularidad de este tipo de aleaciones se debe a que mezcla las buenas propiedades de las aleaciones alfa y las aleaciones beta, presentando unas características muy balanceadas, de forma que presentan una muy buena resistencia a la fluencia a elevadas temperaturas, buena ductilidad y elevados valores de dureza (provenientes de la fase alfa), además de una alta resistencia a la tracción y a la fatiga (provenientes de la fase beta). De las aleaciones alfa viene también su soldabilidad, que irá disminuyendo a medida que aumenten los estabilizadores beta presentes en la aleación. En la tabla 3-7 podremos observar las aleaciones más importantes y algunas de sus propiedades mecánicas.

Tabla 3-5. Propiedades mecánicas y aplicaciones de las aleaciones alfa + beta más importantes [27]

Material	Módulo de Young (MPa)	Límite elástico (MPa)	Carga de rotura (MPa)	Elongación (%)
Ti-6Al-4V (IMI318)	114	830	900	10
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	114	1100	1170	10
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	114	1055	1125	-
Ti-10V-2Fe-3Al	103	1100	1170	-
Ti-2Al-2Sn-4Mo-0.5Si	114	1000	1100	13
Ti-6Al-6V-2Sn	114	1170	1275	10

Como podemos observar los estabilizadores alfa se suelen encontrar entre el 2 y el 6% del peso, mientras que los estabilizadores beta se sitúan normalmente entre el 4 y el 10%. En cuanto a sus propiedades, se suelen situar en un punto intermedio entre las aleaciones alfa y las beta. Por ejemplo, la carga de rotura del Ti-6Al-4V

suele estar en torno a los 900 MPa, la cual es superior a la de las aleaciones alfa (en torno a los 800 MPa), pero inferior a la mayoría de las aleaciones beta (entre 1150 y 1400 MPa). Algo parecido ocurre con la resistencia a la fluencia a altas temperaturas, la resistencia a la fractura o la ductilidad. Al igual que las aleaciones alfa, las aleaciones alfa + beta son endurecibles a través de tratamientos térmicos, aunque no incrementan tanto sus propiedades mecánicas como en las aleaciones alfa. Normalmente el tratamiento térmico se suele hacer a unas temperaturas de entre 480 a 650 °C, aumentando la resistencia del material en un 30-50% respecto al estado recocido. Las aleaciones alfa + beta tratadas térmicamente suelen tener una resistencia a la fractura de alrededor de 1400 MPa.

3.2.5.1 Aplicaciones

Como ya se ha mencionado, cuando hablamos de aleaciones alfa + beta nos referimos principalmente a la aleación Ti-6Al-4V, la cual abarca prácticamente la totalidad de su uso y es empleada en multitud de aplicaciones.

El uso más frecuente del Ti-6Al-4V es para aplicaciones que requieran soportar cargas muy elevadas. Para este tipo de aplicaciones se elige a las aleaciones de titanio alfa + beta por encima de otras como las aleaciones de aluminio endurecido debido a sus más elevadas cargas de rotura y módulo de elasticidad, resistencia a la fatiga, a la corrosión, y capacidad para soportar mayores temperaturas.

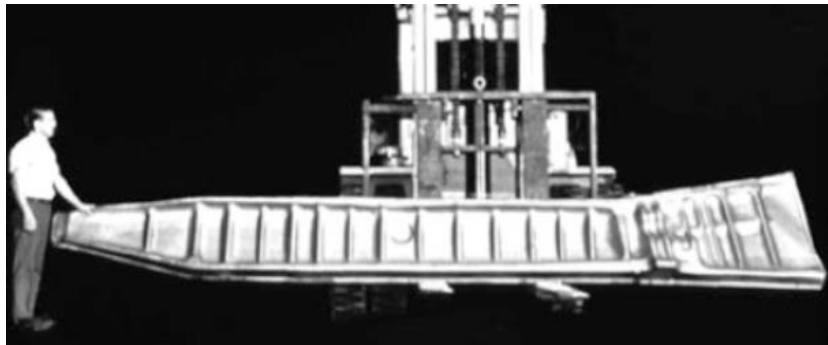


Figura 3.5. Gran forjado de Ti-6Al-4V para el tren de aterrizaje del Boeing 747 [26]

El Ti-6Al-4V es muy requerido también para partes rotacionales y no rotacionales en los motores del avión. La mayor limitación del Ti-6Al-4V es su temperatura máxima de trabajo, la cual se establece en torno a los 300 °C, que restringiendo su aplicación a las aspas de los ventiladores (figura 3.4), a las secciones de baja presión del compresor de baja y a las secciones frontales del compresor de alta.



Figura 3.6. Grandes aspas de ventiladores (la más grande de más de un metro) fabricadas de Ti-6Al-4V forjado [26]

El Ti-6Al-4V también es empleado para la nueva tecnología de fabricación de rotores de álabes integrados, bien uniendo los álabes al disco a través de soldadura por fricción o fabricando el rotor completo en una misma pieza a través de mecanizado.

3.3 Conformado del titanio

La relación en el titanio entre el límite elástico y el límite de Young resulta en una gran cantidad de springback, al menos de 15-25°, tras el conformado en frío. Para compensar este hecho, normalmente el titanio es sobre conformado. Además del springback, el conformado en frío que conlleve el uso de fuerzas elevadas requerirá una operación de alivio de tensiones entre las operaciones de conformado, que deberán hacerse a bajas velocidades para evitar posibles grietas u otros defectos. El conformado en frío además incrementa la resistencia a la rotura y el límite elástico, pero provoca una leve caída en la ductilidad. Las aleaciones de titanio que son sometidas a conformado en frío también experimentan una disminución en el límite de elasticidad en una dirección una vez se ha realizado un esfuerzo en otra dirección, esto es conocido como el efecto Baushinger. De esta forma, un esfuerzo de tracción del 2% sobre el Ti-6Al-4V provocará que el límite elástico por compresión se reduzca a la mitad, sin embargo, un alivio de tensiones devolverá restaurará las propiedades del material, tal y como podremos ver en la figura 3.5.

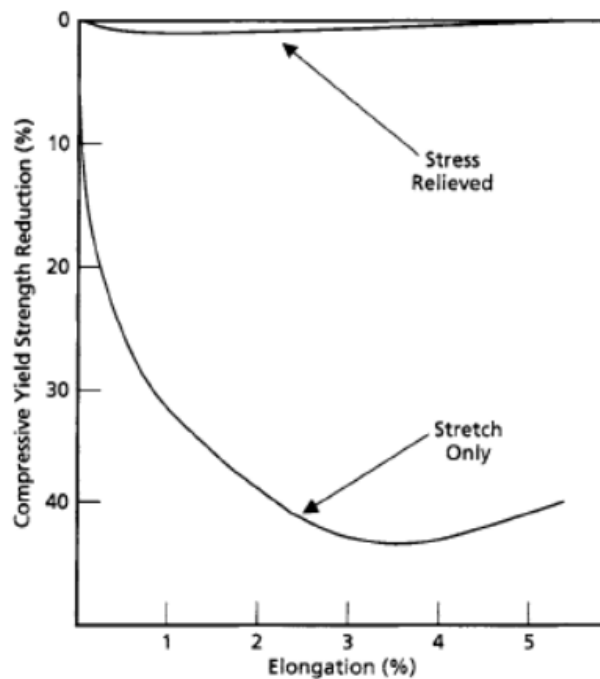


Figura 3.7. Efecto Baushinger en el Ti-6Al-4V [25]

Excepto para espesores delgados, las aleaciones alfa y alfa + beta suelen ser conformadas en caliente, mientras que las aleaciones beta son mucho más fáciles de deformar en frío, siendo una de ellas (Ti-15-3), al igual que los grados puros de titanio, fácilmente conformable a temperatura ambiente. Cuando las piezas son conformadas en frío se les realiza posteriormente un tratamiento de alivio de tensiones para eliminar las tensiones residuales, restaurar su límite elástico, mejorar la precisión dimensional y hacer al material más resistente a agrietamientos posteriores. El conformado en caliente suele hacerse a unos 600-800 °C, consiguiendo con ello mejorar la formabilidad, reducir el springback y eliminar la necesidad de un alivio de tensiones posterior. Sin embargo, se incrementa el coste de la producción al tener que calentar el material, por la necesidad de emplear útiles más caros capaces de soportar las elevadas temperaturas del proceso y por la exigencia de eliminar la superficie contaminada tras el conformado. Aunque el proceso de conformado puede hacerse en vacío, a través de atmósferas protectoras o mediante el uso de recubrimientos superficiales anticorrosivos, lo más habitual es realizar el conformado sin ningún tipo de protección y eliminar posteriormente la contaminación superficial por medio de un decapado.

3.4 Mecanizado del titanio

La tecnología en el mecanizado del titanio ha tenido muy pocos avances desde la década de 1960 hasta ahora, por lo que continúa siendo un material difícil de mecanizar por los siguientes motivos [25]:

1. El titanio es muy reactivo y la viruta tiende a soldarse con las herramientas provocando fallos prematuros en las mismas. Casi todos los materiales tienden a reaccionar con el titanio cuando la temperatura excede los 510°C.
2. La baja conductividad térmica del titanio provoca la acumulación de calor en la interfaz herramienta-pieza. Esta baja conductividad también provoca que el calor generado se conduzca hasta la pieza, por ejemplo, en el caso del Ti-6Al-4V el 80% del calor generado lo tiene que soportar la herramienta. Esto contrastaría con el mecanizado del aluminio, en el que casi todo el calor generado es expulsado con la viruta.
3. El relativamente bajo módulo de Young en el titanio provoca una excesiva deformación en el mismo cuando se trabaja con espesores delgados. Este bajo módulo también es el principal causante de las vibraciones producidas durante el mecanizado del titanio.
4. El titanio mantiene sus propiedades de dureza y resistencia a elevadas temperaturas, lo que da lugar al desgaste de las herramientas utilizadas y se producen tensiones mecánicas muy elevadas en las proximidades al filo cortante. Esto contrasta también con lo que ocurre en el mecanizado del aluminio, donde las altas velocidades del mecanizado provocan el ablandamiento de la pieza facilitando la operación.
5. Operaciones inadecuadas de mecanizado, sobre todo en el desbaste, pueden provocar daños superficiales a la pieza y reducir considerablemente su resistencia a la fatiga.

Para evitar estos problemas y conseguir un resultado exitoso en el mecanizado del titanio sería necesario seguir las siguientes instrucciones:

1. Usar velocidades de corte reducidas para disminuir la temperatura de la herramienta aumentando su esperanza de vida, la cual es extremadamente corta cuando se usan velocidades de corte elevadas.
2. Mantener velocidades de avance elevadas y asegurar que las profundidades de corte sean mayores que la capa endurecida resultante de la operación de corte previa.
3. Utilizar generosas cantidades de fluidos de corte, ya que ayudan en la transferencia de calor, disminuyendo las fuerzas que tienen que soportar las herramientas.
4. Mantener las herramientas afiladas. Con el desgaste de la herramienta, el metal se acumula en el filo de la misma provocando un acabado superficial pobre y una excesiva deformación en la pieza.
5. Nunca cortar la alimentación mientras que la herramienta y la pieza estén en contacto.
6. Usar arranques robustos que aseguren la profundidad del corte minimizando la flexión.

3.5 Tratamientos térmicos

Como se ya comentó anteriormente todas las aleaciones de titanio son tratables térmicamente pero solo las aleaciones alfa y las alfa + beta ven mejoradas sus características mecánicas tras ser sometidas a tratamientos térmicos. Una gran desventaja de este proceso para el titanio es que no existen métodos de ensayos no destructivos para comprobar la respuesta del material al tratamiento, a diferencia de las aleaciones de aluminio y acero donde se usan ensayos de dureza y conductividad para verificar la correcta ejecución del tratamiento térmico.

En la figura 3-1 podemos ver un diagrama de fases del Ti-6Al-4V, a partir del mismo podremos estudiar más fácilmente la respuesta de esta aleación al tratamiento térmico en términos de relaciones de fase.

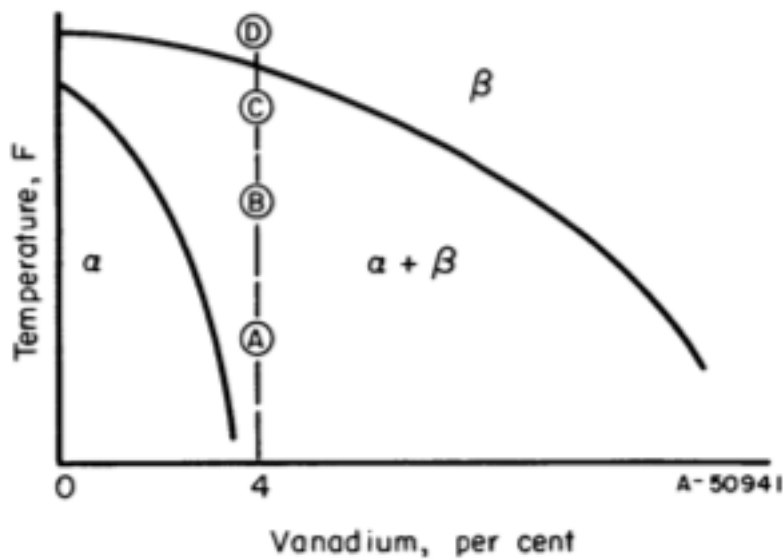


Figura 3-8. Diagrama de fases del Ti-6Al-4V [12]

Cuando la temperatura de recocido se sitúa entre los 650 y los 760 °C (punto A), la estructura resultante es principalmente perteneciente a la fase α , debido a la alta solubilidad del vanadio en la fase α , y a la presencia del aluminio, un estabilizador de la fase α . Cuando se aumenta la temperatura de recocido (puntos B y C) se produce una mejora en la dureza del material, al incrementarse también la cantidad de la fase β en la aleación. Si el recocido se realiza a una temperatura menor que la temperatura de inicio de la martensita, que se suele formar a unos 955 °C la microestructura final estará formada por granos equiaxiales de α y de β . Esta microestructura presenta una buena combinación de tenacidad, ductilidad y resistencia a la fatiga, razón por la cual es la más frecuentemente usada en la aleación Ti6Al4V. Aunque la mejor respuesta del Ti-6Al-4V al tratamiento térmico se da al aumentar más la temperatura de recocido hasta el punto D, sin embargo, este incremento de temperatura también provoca un decremento de la ductilidad del material, razón por la cual las temperaturas de recocido más utilizadas suelen estar entre los puntos C y D.

Los elementos intersticiales presentes en la aleación, como el carbono, el oxígeno y el nitrógeno, provocan que se acelere la transición desde la fase α a la fase β , debido a la presencia de estos elementos disueltos en la fase β .

3.5.1 Recocido

Se somete a la aleación a un tratamiento de recocido para obtener mejores características de ductilidad, resiliencia, resistencia a la fluencia en caliente (creep), y mayor estabilidad térmica. La temperatura de recocido del Ti-6Al-4V se suele situar en torno a los 850 °C, con la que consigue máxima ductilidad y la mejor formabilidad. Esta temperatura debe ser disminuida cuando la pieza de trabajo no es inmediatamente sometida a temple.

3.5.2 Envejecimiento y precipitación

Después del recocido, a las aleaciones β ó $\alpha + \beta$ se les suele someter a un tratamiento de envejecimiento para mejorar sus propiedades mecánicas. El proceso consta de dos etapas, una de solubilización a alta temperatura, seguida de un temple mediante aire. Durante este enfriamiento, la fase β se transformará en fase α dependiendo de la velocidad de enfriamiento, la temperatura de envejecimiento y del espesor. Después del temple la aleación es sometida a un proceso de maduración, que en el caso del Ti-6Al-4V vendrá dado por un rango de temperaturas que irá desde los 482 °C hasta los 593 °C durante 1 a 24 horas. Durante esta fase, finas partículas de la fase α se precipitan sobre la fase β retenida o ya transformada. Si

usamos unas temperaturas de recocido más elevadas, se producirá una significativa disminución de la dureza del material a cambio de un muy leve aumento de su ductilidad.

Este tratamiento incrementa las propiedades mecánicas del material desde un 30 a un 50 % con respecto a las que poseen en estado de recocido.

3.5.3 Alivio de tensiones

Con este tratamiento se busca principalmente evitar la tendencia al agrietamiento y la deformación del material. En este caso se usarán temperaturas que rondarán desde los 537 hasta los 648 °C, durante un periodo que podrá ser de media hora o una hora. Para minimizar la oxidación se buscará minimizar la temperatura y el tiempo de enfriamiento tanto como sea posible.

Hay que tener presente que dicho tratamiento aplicado a aleaciones tratables por maduración, modificará la microestructura de la ZAT pudiendo producir importantes pérdidas de ductilidad en las aleaciones $\alpha+\beta$ y β , puesto que dichos tratamientos producen envejecimientos no controlados en la ZAT.

3.6 Soldadura del titanio

El titanio por lo general está considerado como altamente soldable debido sobre todo a su baja conductividad térmica que evita la disipación del calor, su baja dilatación térmica y bajo módulo de Young, que hacen que se reduzca el estrés soportado por la pieza durante el soldeo y su alta resistencia eléctrica provoca su habilidad para ser unido mediante el soldeo por resistencia.

En la tabla 3-9 podremos observar una clasificación de las aleaciones de titanio dependiendo de las características de resiliencia y ductilidad que se obtienen una vez soldadas.

Tabla 3-6. Soldabilidad de las aleaciones de titanio [21]

Aleación	Soldabilidad
Titanio Puro Comercial	A
Aleaciones α	
Ti-0.2 Pd	A
Ti-5 Al-2.5Sn	B
Ti-5Al-2.5Sn ELI	A
Aleaciones próximas a α	
Ti-8Al-1Mo-1V	A
Ti-6Al-2Cb-1Ta-0,8Mo	A
Ti-6Al-4Zr-2Mo-2Sn	B
Aleaciones $\alpha + \beta$	
Ti-6Al-4V	B
Ti-6Al-4V ELI	A
Ti-7Al-4Mo	C
Ti-6Al-6V-2Sn	C
Ti-8Mn	D
Aleaciones β	
Ti-13V-11Cr-3Al	B
A- excelente.	
B- muy bueno.	
C- limitado a aplicaciones especiales.	
D- Soldeo no recomendado.	

A continuación, en la tabla 3-5 se expondrán las ventajas e inconvenientes del soldeo de las distintas aleaciones de titanio.

Tabla 3-7. Ventajas e inconvenientes del soldeo de las aleaciones de titanio [21]

Aleación	Ventajas	Inconvenientes	Soluciones
Ti puro	Buena soldabilidad, conformabilidad, resistencia a la corrosión	Contenidos Fe > 0,05% produce corrosión preferencial en soluciones de ácido nítrico. Se generan poros galvánicos entre los granos $\beta + \alpha$.	Utilizar consumible bajo en Fe, evitar todo tipo de contaminación.
Aleaciones α	Buena soldabilidad, ductilidad no afectada por las operaciones de soldeo. Buena resistencia a la corrosión en ambientes reductores.	Contaminación con Fe causa pérdida de propiedades anticorrosión.	Se suelda en estado recocido para evitar la pérdida del endurecimiento por deformación.
Aleaciones con fase α en mayoría	Buena resistencia a la fluencia en caliente.	Problemas de agrietamiento en secciones grandes.	Se debe aliviar tensiones tras el soldeo.
Aleaciones con fase β en mayoría	Mejora de las propiedades mecánicas mediante aplicación de tratamientos térmicos de envejecimiento.	Altamente afectadas por el ciclo térmico de soldadura. Baja ductilidad asociada a transformaciones en la ZAT o metal de soldadura tendencia al agrietamiento de las aleaciones con altos contenidos en β -estabilizadores.	Soldar con aportes α o $\alpha + \beta$, para reducir fase β en cordón, esto eleva la ductilidad de la soldadura. Tratamiento de alivio de tensiones posterior al soldeo combinado con precalentamiento de 150 °C - 175 °C
Aleaciones β	La mayoría soldables, tanto en condición de recocido como de tratamiento térmico. Buena ductilidad.	Baja resistencia en estado bruto de soldeo.	Debe soldarse en estado de recocido. Someter a la soldadura a un martillado y posteriormente al conjunto a un tratamiento de solubilización y envejecimiento.

3.6.1 Resistencia a la fisuración

Uno de los puntos más importantes a considerar en el soldeo de titanio es la resistencia a la fisuración de la unión soldada, que dependerá principalmente de la resiliencia y carga de rotura del material base. De esta forma, las aleaciones que presenten una carga de rotura mayor a 70 Kg/mm² y una resiliencia menor a 20,4 Julios (Charpy-V) pueden presentar agrietamientos bajo condiciones adversas.

Esta tendencia al agrietamiento en las aleaciones de baja resiliencia y alta resistencia puede verse mitigada mediante la aplicación de un precalentamiento a 150-178 °C y un posterior tratamiento de alivio de tensiones.

En cuanto a la afinidad del titanio para unirse mediante soldeo a otros metales, cabe destacar que ésta sería bastante pobre en metales como el Fe, Ni, Cu y Al, ya que formarían compuestos intermetálicos frágiles, aunque se podrían usar procesos de soldeo de baja dilución como el soldeo con explosivos, por difusión o por fricción para realizar estas uniones. El titanio sí puede unirse mediante soldeo con éxito a otros metales como zirconio, niobio, tántalo y hafnio.

3.6.2 Materiales de aporte

La composición del material de aporte deberá ser básicamente la misma que el metal base, aunque en aplicaciones en las que la ductilidad de la soldadura debe prevalecer sobre las propiedades de resistencia, se deberá utilizar titanio puro como material de aporte.

Es crítico el garantizar la correcta limpieza de los consumibles utilizados en el soldeo, ya que pequeñas contaminaciones pueden llevar a grandes defectos.

3.6.3 Efectos metalúrgicos de la soldadura

En la soldadura TIG se supera el punto de fusión, y por lo tanto se activa la transformación de cambio de fase α a fase β , razón por la cual en las zonas cercanas al baño predomina la fase β o bien una mezcla de $\alpha+\beta$. Debido al gradiente de temperaturas formado se produce el crecimiento de grano de la fase β orientado hacia la zona de solidificación.

Los cambios metalúrgicos que se producen dependen de la estructura del material, de tal forma que en el titanio puro de grado comercial, y en las aleaciones α y $\alpha+\beta$ los granos de fase β formados a alta temperatura, pasa a ser desde formas aciculares y aserradas para el titanio puro y aleaciones α hasta las aciculares-Widmanstätten para los $\alpha+\beta$. Mientras que en las aleaciones β su microestructura no sufre grandes alteraciones durante el ciclo de soldadura.

Las zonas del metal base que durante el proceso de soldadura no alcancen temperaturas cercanas a los 570 °C no sufrirán modificaciones metalúrgicas importantes, mientras que las zonas cercanas a la unión soldadas en titanio puro o aleaciones alfa donde se alcancen temperaturas que vayan desde los 577 °C hasta la zona de transformación de α a β , sufrirán un efecto de recocido y un alivio de tensiones.

La soldabilidad de las aleaciones ricas en fase α no se ven afectadas por los tratamientos térmicos anteriores o posteriores al soldeo, mientras que en las aleaciones β es esencial el elegir adecuadamente estos tratamientos para conseguir las propiedades deseadas en la unión.

3.6.4 Protección durante el soldeo

Debido a que el titanio a altas temperaturas reacciona con los gases atmosféricos como el hidrógeno, el oxígeno o el nitrógeno, se hace necesario proteger todas aquellas zonas que durante el soldeo o en fases anteriores o posteriores al mismo superen los 262 °C.

Los medios de protección más utilizados son las cámaras de vacío (10^{-4} torr o menos) y los gases de protección como el helio o el argón. En el caso de soldeo sin cámara se deberán utilizar dispositivos especiales que impidan que el cordón de soldadura entre en contacto con el aire hasta que la temperatura del mismo haya disminuido por debajo de los 430 °C.

3.6.5 Porosidad en la soldadura

La porosidad en la soldadura es un defecto producido por la formación de burbujas de gases durante la solidificación del baño de fusión. Este defecto puede mitigarse a través del control de una serie de parámetros [21]:

- **El material base:** debe limitar su contenido en hidrógeno a 150 ppm.
- **El material de aporte:** no debe contener más de 150 ppm de H_2 , ni estar impregnado de grasa o aceite.

- **La humedad:** se evita precalentando a 122 °C.
- **La falta de limpieza de la unión y sus alrededores:** es la principal fuente de porosidad en las soldaduras de titanio y sus aleaciones.
- **Velocidad de enfriamiento:** Una velocidad de enfriamiento elevada puede favorecer la aparición de los poros.

3.6.6 Proceso de soldeo

Para el soldeo realizado sin cámara, es necesario que tanto el baño de fusión como las zonas adyacentes, la raíz de la soldadura y el cordón que se está enfriando, sean protegidos adecuadamente por gas inerte.

La pistola proporciona el flujo de gas inerte que protege al baño de fusión y las zonas cercanas. Deberán emplearse toberas cuyos diámetros vayan desde 12,7 a los 19 mm, eligiendo siempre el más grande que garantice una accesibilidad y visibilidad adecuada. Conviene asimismo utilizar “lentes de gas” para producir un flujo de gas laminar que evite la formación de turbulencias, y de esta forma la incorporación de aire a la soldadura.

Otra ayuda importante para soldar láminas de titanio es el dispositivo de resumidero de calentamiento o de enfriamiento. Estos dispositivos provocan que la soldadura se enfríe más rápidamente, reduciendo de esta forma la cantidad de gas de protección que es necesario utilizar. Los resumideros de calentamiento suelen fabricarse de cobre, de acero inoxidable o de aluminio, aunque con estos últimos hay que tener cuidado debido a su bajo punto de fusión.

En la figura se podrá observar un arreglo típico para el soldeo del titanio.

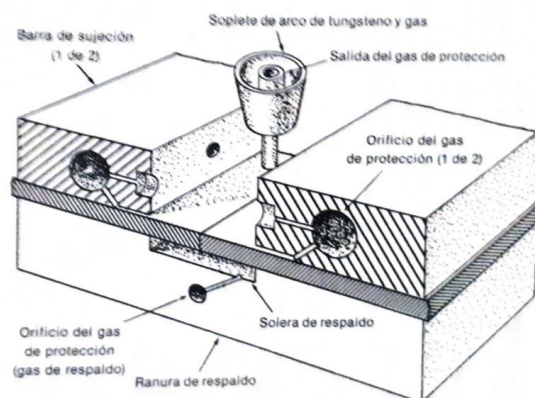


Figura 3-9. Arreglo típico en soldadura de titanio [4]

Como ya se dijo anteriormente el titanio reacciona a altas temperaturas con los gases atmosféricos, por lo que será necesario proteger el cordón de soldadura hasta que la temperatura del mismo baje hasta niveles en los que no se produzca oxidación. Esto normalmente se consigue mediante cajas de remolque cuya longitud dependerá del aporte térmico y de la velocidad de soldeo.

Para el soldeo de tubería, es necesario purgar previamente el interior del tubo con gas inerte para eliminar la presencia de aire en la raíz. El volumen de gas requerido para realizar la purga es de 6 veces (al menos) el volumen del espacio que se va a purgar.

A pesar de todo esto, la manera más sencilla y eficiente de proteger el cordón durante el soldeo es mediante el uso de cámaras cerradas. Estas cámaras pueden ser de dos tipos:

- Las que se purga mediante gas inerte.
- Las que eliminan en un primer momento el aire estableciendo el vacío, para después llenar la cámara con gas inerte.

En ambos casos es necesario mantener una presión positiva para evitar la entrada de aire.

3.6.7 Procesos de soldeo de titanio

A continuación, se van a mostrar los distintos procesos que se utilizan para soldar titanio:

3.6.7.1 Soldeo MIG

El soldeo MIG es más económico que el TIG. Sin embargo, es un proceso que requiere de protecciones especiales en el momento en que se produce la transferencia del material. Esto ocurre por el reducido tamaño de las gotas de material de aporte formadas, que, unido a la elevada temperatura de trabajo provocan una gran facilidad para la contaminación.

Normalmente este proceso se realiza fuera de cámara con el equipo de trabajo convencional también usado para la soldadura TIG, con la diferencia de que, en el MIG, los dispositivos de protección “remolques” deberán ser de mayores dimensiones por la menor velocidad de enfriamiento del cordón en este proceso.

El titanio y sus aleaciones pueden soldarse a partir de los tres medios de transferencia existentes:

- Cortocircuito La transferencia en cortocircuito se utiliza para el soldeo de espesores pequeños en todas las posiciones.
- Globular: La transferencia globular no es aconsejable debido al alto grado de salpicaduras y la posibilidad de falta de fusión.
- Rocío: La transferencia de rocío está aconsejada para el soldeo en plano y cornisa de grandes espesores.

Tabla 3-8. Condiciones típicas de soldeo MIG de titanio [21]

Espesor (mm)	Posición de soldeo	Gas de protección	Tipo de transferencia	Electrodo		Voltaje (V)	Corriente (A)	Velocidad de pasada (mm/s)
				Diámetro (mm)	Consumo (mm/s)			
3,18	Plana	75Ar-25He	Rocío	1,59	84-95	20	250-260	6
6,35	Plana	75Ar-25He	Rocío	1,59	127-135	30	300-320	6
9,53	Plana	85Ar-25He	Rocío	1,14	366	33	350-360	11
12,7	Plana	75Ar-25He	Rocío	1,59	159-169	40	340-360	6
15,88	Plana	75Ar-25He	Rocío	1,59	169-180	45	350-370	6
25,4	Plana	Ar	Rocío	1,59	161	36-37	320-350	8-10
25,4	Plana	Ar	Rocío	1,59	233	31-33	315-340	5
25,4	Plana	75Ar-25He	Cortocircuito	0,76	275	17-21	140-185	3
25,4	En V	75Ar-25He	Cortocircuito	0,76	233	15-16	100-135	0,76

3.6.7.2 Soldeo por plasma

El proceso de soldeo por plasma es muy similar al soldeo por TIG. Se usa corriente continua y gas plasmático argón y gas de protección también argón, o una mezcla de éste con helio. Se pueden emplear tanto la técnica de “Melt-In” o de convección (que se puede usar con o sin metal de aporte), y el método “Keyhole” o penetración total.

Se pueden realizar soldaduras en espesores 1,6 - 13 mm sin chaflán, con plasma y en modo “keyhole”, sin que se produzca la aparición de poros. Esenciales ventajas presenta el utilizar preparaciones de bordes en “U” con talones de 6 mm con la pasada de raíz en modo “key-hole” y el resto con técnica de convección.

Tabla 3-9. Condiciones típicas de soldeo por plasma de titanio [21]

Espesor (mm)	Técnica de soldeo	Gas de protección	Boquilla		Voltaje (V)	Corriente (A)	Velocidad de pasada (mm/s)	Consumo de varilla (mm/s)
			Diámetro (mm)	Flujo (L/min)				
0,2	Melt-in	Ar	0,76	2,3	-	5	2,1	-
0,38	Melt-in	Ar	0,76	2,3	-	6	2,1	-
3,18	Keyhole	Ar	3,45	42	24	150	6,3	16,9
4,78	Keyhole	Ar	3,45	47-57	30	175	6,3	17,8
6,35	Keyhole	Ar	3,45	76	30	160	5,1	19
7,95	Keyhole	Ar	3,45	71	30	172	5,1	20,3
9,92	Keyhole	75He-25Ar	3,45	151	30	225	4,2	-
12,7	Keyhole	50He-50Ar	3,45	127	30	270	4,2	-

3.6.7.3 Soldeo por haz de electrones

Este método de soldeo consiste en aplicar un haz de electrones de alta de energía produciendo una profunda penetración y permitiendo soldar materiales de gran espesor. Otra gran ventaja es que produce una ZAT muy estrecha, una baja distorsión, además de que se consiguen soldaduras muy limpias por su ejecución en vacío. Mientras que la principal desventaja de este procedimiento es el elevado coste que supone la adquisición del equipo necesario. para su implementación.

Los parámetros a tener en cuenta en el soldeo del titanio con haz de electrones son:

- El voltaje.
- La intensidad.
- El diámetro del haz.
- La velocidad de soldeo.

Tabla 3-10. Condiciones típicas de soldeo por haz de electrones de titanio [21]

Espesor (mm)	Voltaje (KV)	Corriente (mA)	Velocidad de pasada (mm/s)
0,79	30	26	38
1,02	13	50	35
1,14	13	55	29
1,27	85	40	25
2	18,5	90	32
2,4	19	100	29
3,2	20	95	13
5,2	28	170	41
6,4	138	10	10

8,9	130	35	17
16	30	260	25
25,4	25	200	18

3.6.7.4 Soldeo láser

El láser es menos susceptible que el haz de electrones a la disposición que produce la atmósfera en el soldeo fuera de cámara.

Con objeto de evitar la interferencia que el vapor metálico produce en el haz, se emplean como gases de protección helio o mezclas de argón y helio.

Se pueden alcanzar soldaduras de hasta 15 mm de espesor con un láser de 15 Kw de potencia y funcionando en modo “Key-hole”, y en una sola pasada.

3.6.7.5 Soldeo por difusión

La principal ventaja de la soldadura por difusión es que ésta se realiza a una temperatura inferior a la que la aleación pueda sufrir alguna transformación. Para aleaciones β y $\alpha + \beta$ el rango de temperatura se sitúa 24 °C – 38 °C por debajo de la temperatura de transformación. Esto provoca:

- Una menor contaminación atmosférica.
- Una reducida distorsión.
- Se conserva la resistencia a la corrosión del metal base.

El soldeo por difusión del titanio puro se realiza usando los siguientes parámetros:

- Superficie de contacto: 96%.
- Tiempo 1 - 6 horas.
- Temperatura 900-950 °C.
- En cámara de vacío.
- Presión 1,4 – 13,8 MPa.

Para la correcta unión de la superficie, es necesario un acabado superficial de buena calidad, realizándose la preparación de los bodes mediante fresado y una limpieza posterior con HNO₃ – HF.

3.6.7.6 Soldeo por fricción

El soldeo por fricción se aprovecha del calor provocado por el contacto entre dos superficies en movimiento, por los que los parámetros que afectan al proceso, con sus valores típicos para el titanio y aleaciones son los siguientes:

- 1 - 4 Segundos de contacto.
- Velocidades tangenciales de: 305 - 61 m/min.
- Presión de 55 - 103 MPa.

Estas velocidades son mayores que las que se emplean para soldar aceros y aleaciones base níquel, mientras que las presiones son inferiores a las que se utilizan para soldar este tipo de materiales.

3.6.7.7 Soldeo por Resistencia eléctrica

Dada la baja conductividad térmica del titanio, presenta una buena soldabilidad por resistencia eléctrica, siendo menos propenso que el aluminio a variaciones en la geometría del electrodo y presión.

Es fundamental para este proceso realizar una adecuada limpieza de la superficie de contacto, para que ésta

posea la adecuada resistencia eléctrica al paso de la corriente. Para esto se recurrirá a una limpieza química o mecánica:

- Limpieza química: se efectúa por decapado con solución HF – HNO₃ alcanzando una resistencia de contacto de 50 $\mu\Omega$.
- Limpieza mecánica: se realiza por cepillado, con cepillo de inoxidable alcanzando así una resistencia de contacto de 100 $\mu\Omega$.

Para este tipo de tecnología no es necesario proteger la soldadura con gas inerte, con la excepción de que se realicen costuras, en cuyo caso se procederá a proteger el baño de fusión con remolques tal y como se realiza en el soldeo por arco. Los electrodos recomendados son de cobre aleado.

3.6.7.8 Soldeo fuerte

Para este tipo de soldadura, es fundamental la elección adecuada del material de aporte, debido a la alta afinidad del titanio a formar aleaciones con los aportes del soldeo fuerte, lo que puede provocar la formación de compuestos intermetálicos frágiles, mordeduras y uniones de baja ductilidad. Para evitar esto se deberá escoger un material de aporte que alee solo ligeramente con el titanio, además de seleccionar un ciclo de soldeo fuerte que minimice el tiempo de solidificación del aporte. A continuación podemos ver los consumibles más utilizados en el soldeo fuerte del titanio [21]:

- 95Ag - 5Al y 92,5Ag - 7,5Cu insta temperaturas de soldeo de 430 °C y manteniendo bajos los contenidos de Cu ya que el compuesto Ti-Cu es extremadamente frágil.
- Ag - 5Al - 0,5Mn puede realizarse hasta 907 °C, proporcionando uniones de buena resistencia mecánica.
- Aportes de aluminio puro o aleado proporciona buena resistencia mecánica y ante la corrosión hasta 262 °C. La temperatura de soldeo será de 682 °C.
- 48Ti-48Zr-4Be ó 43Ti-43Zr-12Ni-2Be para aplicaciones que requieren alta resistencia y buen comportamiento contra la corrosión a temperaturas de hasta 542 °C. El Ti-Zr-Be puede a su vez utilizarse para soldar titanio a acero al carbono, acero inoxidable y metales refractarios. La temperatura de soldeo será de 990 °C.

Dentro de los distintos procesos utilizados en el soldeo fuerte, hay tres que se emplean para el titanio y sus aleaciones [21]:

- Soldeo por inducción: es aconsejado cuando exista la posibilidad de formación de compuestos intermetálicos frágiles.
- Soldeo en horno: el metal de aporte no debe dar problemas de fragilización.
- Soldeo con soplete: utilización de soplete oxiacetilénico con fundentes especiales. Se utilizan llamas reductoras.

También es importante tener en cuenta el estado del material cuando se realice el proceso, ya que aunque el titanio puro y las aleaciones α no se ven afectadas por el ciclo térmico del soldeo fuerte, esto sí ocurre en las aleaciones $\alpha + \beta$ y las aleaciones β en estado recocido.

Para este último la solución es soldarlos a la temperatura del tratamiento de envejecido, de forma que se consiguen mejores valores de resiliencia. Para el caso de aleaciones $\alpha + \beta$, existen tres alternativas posibles:

- Primero recocer y luego soldar por debajo de la temperatura de recocido.
- Soldar por encima de la temperatura de recocido e incorporar el enfriamiento o recocido.
- Soldar por encima de la temperatura de recocido y luego recocer.

3.6.7.9 Soldeo TIG

Es el más utilizado en espesores de hasta 3,2 mm (en el capítulo 4 se expondrán con detalle todos los parámetros a tener en cuenta para este tipo de soldeo según la normativa aeronáutica).

4 ESPECIFICACIONES EN EL PROCESO DE SOLDADURA TIG DE TITANIO

Para llevar a cabo la soldadura se seguirán las especificaciones descritas en Airbus, tanto en las especificaciones civiles (AIPS01-04-001 – General requirements for welding and allied processes y AIPS01-04-008 – Tungsten Inert Gas (TIG) Welding of Metallic Materials) como en la especificación militar (I+D-P-181 – Soldadura por fusión de metales). Para la elaboración de este subcapítulo nos hemos basado principalmente en la especificación militar, debido a la descripción más completa del proceso que aparece en la misma, aunque también vendrá reflejado en el presente documento las discrepancias que aparezcan entre ambas normas.

4.1 Clasificación

Dependiendo de las exigencias de calidad de la unión soldada se establecen tres niveles de aceptación para la soldadura [13]:

- **Clase A:** Nivel de aceptación que depende del procedimiento de soldadura y el tipo de material empleado. Representa los mejores resultados de producción que se pueden alcanzar en condiciones óptimas.
- **Clase B y C:** Niveles de aceptación que corresponden a las tolerancias más amplias.

4.2 Material de aporte

Para el titanio se cumple la norma más general para los materiales de aportación, y es que éste tiene que ser parecido a su material base. El material de aporte se presenta en forma de varilla o alambre. En la especificación I+D-P-181 se nos facilita una tabla donde aparecen las normas aplicadas para cada aleación de titanio usada como material base.

Tabla 4-1. Metales de aporte [13]

Metales a soldar	Metales de aportación	
	Designación I+D-M-031	Especificación (varilla o alambre)
No aleado (L-7002 ² y L-7003 ³)	L-7002	AMS 4951, AWS A5.16
L-7101 ⁴	L-7101	AMS 4953 ó AMS 4951
L-7103 ⁵	L-7301	AMS 4956
L-7301 ⁶	L-7301	AMS 4954, AMS 4956, AWS A5.16

Como aclaración a la tabla 4-1 se ha realizado la tabla 4-2, donde podremos observar la composición de las varillas utilizadas, además de su denominación según AWS A5.16, en función del metal base empleado.

² Titanio grado 2

³ Titanio grado 3

⁴ Ti-5Al-2,5Sn

⁵ Ti-6Al-2Sn-4Zn-2Mo-0,08Si

⁶ Ti-6Al-4V

Tabla 4-2. Composición y designación de las varillas [14]

Metal base	Designación varilla (según AWS A5.16)	Composición (% en masa)								
		C	O	N	H	Fe	Al	Sn	Y	V
Titanio grado 2 y titanio grado 3	ERTi-2	0,03	0,08 a 0,16	0,015	0,008	0,12	-	-	-	-
Ti-5Al-2,5Sn	ERTi-6	0,01	0,175	0,05	0,015	0,5	4,5 a 5,75	2 a 3	0,05	-
Ti-6Al-2Sn-4Zn-2Mo-0,08Si y Ti-6Al-4V	ERTi-23	0,03	0,03 a 0,11	0,012	0,005	0,2	5,5 a 6,5	-	-	3,5 a 4,5

Es de gran importancia la limpieza y cuidado del material de aportación para evitar así la contaminación del baño. Los defectos físicos en la varilla, tales como araños, grietas, empalmes o solapes pueden contener contaminantes, que serían imposibles de eliminar a través de la limpieza de la misma.

4.3 Gases de protección

Para evitar la fragilización por oxígeno, nitrógeno e hidrógeno las zonas que llegan a calentarse por encima de los 260 °C deben protegerse de la atmósfera. Para ello deberá emplearse un gas inerte de gran pureza, en nuestro caso será Argón, Helio, o una mezcla de ambos. En la tabla 4-3 podremos observar las normas que reflejarán las condiciones en las que deberán estar los gases de aportación, además de la pureza de los mismos.

Tabla 4-3. Pureza del gas de protección [13]

Gas de protección	Especificación	Pureza del gas (% en volumen)
Argón	MIL-A-18455 (Excepto a 99,995% en vol. y O ₂ [10 p.p.m. en volumen])	99,985 ⁷
Helio	BB-H-886, Grado A	99,995

El gas de protección deberá aplicarse en ambos lados del cordón, durante y después del soldeo, hasta el enfriamiento de las piezas soldadas.

4.4 Electrodo

Para el titanio y las aleaciones de titanio los mejores resultados en el soldeo se dan con el uso de corriente continua, por lo cual se seleccionará el electrodo de 2% de Th (AWS A5.12 Class EW Th-2) y cumplirán con los requisitos de la norma AWS A5.12.

⁷ El porcentaje en volumen máximo para el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno será del 0,005% para cada uno de ellos

Tabla 4-4. Características del electrodo empleado [15]

Designación	Óxido principal	Máxima cantidad de óxido permitido (% en masa)	Máximas impurezas permitidas (% en masa)
EWTh-2	ThO ₂	1,7-2,2	0,5

El diámetro del electrodo delimitará la intensidad de corriente utilizada durante el proceso de soldeo. En la tabla 4-5 podremos ver el diámetro de nuestro electrodo, que para el caso del titanio no variará por el espesor del material.

Tabla 4-5. Diámetro del electrodo [13]

Material	Espesor nominal (mm)	Diámetro del electrodo (mm)	Corriente nominal (A)
Titanio y aleaciones de titanio	1,6	1,6	70-120

El extremo oxidado del electrodo deberá eliminarse antes del encendido del arco.

4.5 Limpieza previa

Para la limpieza previa de las piezas de titanio nos hemos basado en la especificación de Airbus I+D-P-090. En ella podemos distinguir la siguiente secuencia de procesos para la limpieza:

4.5.1 Desengrase

Si la contaminación superficial es leve las piezas se someterán a una limpieza con disolventes, mientras que si la contaminación es más grave será más complicada eliminarla con disolventes y se empleará un desengrase por emulsión.

- Desengrase con disolventes: Se usarán disolventes no clorados, tales como el Z-23.117 (metil-etil-cetona; MEK), Z-23.101 (tolueno) o equivalentes, aplicándose o bien por inmersión o frotando a través de un algodón empapado con el disolvente.
- Desengrase por emulsión: Se usarán productos comerciales como el Z-23.209 o equivalentes, con las condiciones de trabajo y concentraciones acordadas por el cliente. Podrá ser aplicado o bien mediante inmersión o ducha o bien manualmente. Para el lavado se empleará agua abundante a 50 °C durante un mínimo de 5 minutos.
- Desengrase alcalino: Proceso a realizar antes de la limpieza alcalina, y para el cual se emplearán productos comerciales como el Z-23.229. El proceso se realizará mediante inversión y con las condiciones expuestas en la tabla 4-6.

Tabla 4-6. Condiciones del producto en el desengrase [16]

Designación	Producto	Concentración (% volumen)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Agitación	Material del tanque
Z-23.229	Bonderite C-AK 6849 aero alcaline cleaner	10 - 20	55 - 70	5 - 10	Por aire	Acero o acero inoxidable

4.5.2 Limpieza alcalina

Se realizará por inmersión y con las condiciones dadas en la tabla 4-7.

Tabla 4-7. Condiciones del producto en la limpieza alcalina [16]

Designación	Producto	Concentración (% volumen)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Agitación	Material del tanque
Z-23.201	Bonderite C-AK 4215 NC-LT aero	45-60	45 - 60	10 - 15	Por aire limpio, seco y filtrado	Chapa de hierro
Z-23.213	Bonderite C-AK ARR-4181 aero	120 - 360	88 - 93	5 - 30	Por aire limpio, seco y filtrado	Acero inoxidable

4.5.3 Enjuague posterior a la limpieza alcalina

Se realizará mediante duchas o inmersión, usando agua industrial I⁸, aplicándola durante al menos 5 minutos.

4.5.4 Eliminación de contaminación metálicas

Cuando aparezcan sobre la superficie del material restos de otros materiales procedentes del mecanizado o del conformado, las piezas deberán sumergirse en una solución acuosa de ácido nítrico, con unas características dadas en la tabla 4-8.

Tabla 4-8. Condiciones del producto en eliminación de contaminantes [16]

Producto	Concentración (% volumen)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Material del tanque
Ácido nítrico 40° Be (Z-23.525)	45-55	Ambiente	20 - 40	Hierro forjado de P.V.C
Agua pura ⁹	Resto	Ambiente	20 - 40	Hierro forjado de P.V.C

(*) El tiempo fijado en esta tabla es el recomendado. El tiempo real de inmersión dependerá del tipo y cantidad de contaminación, no debiendo ser superior en ningún caso a 4 horas.

4.5.5 Enjuague posterior a la eliminación de contaminantes metálicos

Las piezas serán enjuagadas mediante duchas en agua pura o bien mediante inversión, durante un tiempo mínimo de 5 minutos, pudiéndose realizar un enjuague posterior por inmersión en agua pura caliente (80°C como máximo), para facilitar su posterior secado.

4.5.6 Decapado fluo-nítrico

Esta operación se realiza de manera posterior a los tratamientos térmicos para eliminar la capa de óxidos

⁸ Propiedades del agua industrial I [17]: resistividad a 20 °C > 2500 Ωcm; Sólidos disueltos ≤ 400 ppm; Cloruros < 30 ppm; pH a 25 °C: 5-8,5.

⁹ Propiedades del agua pura [17]: resistividad a 20 °C > 100.000 Ωcm; Sólidos disueltos ≤ 20 ppm; Cloruros < 1 ppm; pH a 25 °C: 5-7.

depositada sobre la superficie del material. Para realizar la operación se sumergirá a la pieza en un baño cuya composición y condiciones de trabajo se dan en la tabla 4-9.

Tabla 4-9. Condiciones del producto en el decapado fluo-nítrico [16]

Producto	Concentración	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Factor de ataque	Material del tanque
Ácido nítrico 40-42 °C Be (Z-23.525)	38-42 % en volumen				
Ácido fluhorhídrico 70% (Z-23.525)(*)	3,8-4,2 % en volumen	15-35	2 - 3	0,0063-0,125	Hierro forjado de P.V.C
Ti	<30 g/l				
Fe y Ni	<7,5 g/l				
Relación HNO3/HF	≥10				

(*) Podrá sustituirse por bifloruro amónico (NH₄HF₂) en la proporción de 40 g por litro de baño

La temperatura y el tiempo de inmersión deberán cuidarse meticulosamente, debido a que el factor de ataque aumenta en 0,0045 mm/h/cara, por lo que se podría deformar la pieza.

4.5.7 Enjuague posterior al decapado.

Las piezas se enjuagarán mediante duchas o por inmersión, usándose agua industrial I durante mínimo 5 minutos.

4.5.8 Desoxidado

Se realizará esta operación para eliminar las manchas de óxido transferidas del baño de decapado al de enjuague, y devolver a las piezas su color y brillo original. Para ello las piezas se sumergirán en una solución acuosa de ácido nítrico con las siguientes propiedades:

Tabla 4-10. Condiciones del producto en el desoxidado [16]

Producto	Concentración (% volumen)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Material del tanque
Ácido nítrico 40° Be (Z-23.525)	45-55	Ambiente	30	Hierro forjado de P.V.C
Agua Industrial I	Resto	Ambiente	30	Hierro forjado de P.V.C

4.5.9 Enjuague final

Las piezas serán enjuagadas mediante duchas en agua pura o bien mediante inversión, durante un tiempo mínimo de 5 minutos, pudiéndose realizar un enjuague posterior por inmersión en agua pura caliente (80°C como máximo), para facilitar su posterior secado.

4.5.10 Secado

Se realizará a una temperatura inferior a 110 °C, mediante aire o en estufa.

4.6 Posicionamiento de las juntas

De no fijar el plano, ficha de soldadura o REP, la apertura de encastre (dimensión t en figuras 4-2 y 4-3), se aplicarán los requerimientos de la Tabla 4-11 para el caso del soldeo de piezas de titanio y sus aleaciones

Tabla 4-11. Anchura de encastre en las uniones soldadas [13]

Clase de soldadura	Espesor	Anchura de encastre
Clase A	Soldeo automático	1/4 del espesor ó 0,75 mm, el valor menor
	Soldeo manual	1/2 del espesor ó 1,5 mm, el valor menor
Clases B y C	0,9-3,1	1/2 del espesor
	3,2-6,3	1,5 mm
	6,4-25,4	2,5 mm

La dimensión de la apertura de encastre variará dependiendo del posicionamiento de las juntas, tal y como aparece en la figura 4-2, donde e es el espesor de la pieza y t la apertura de encastre.

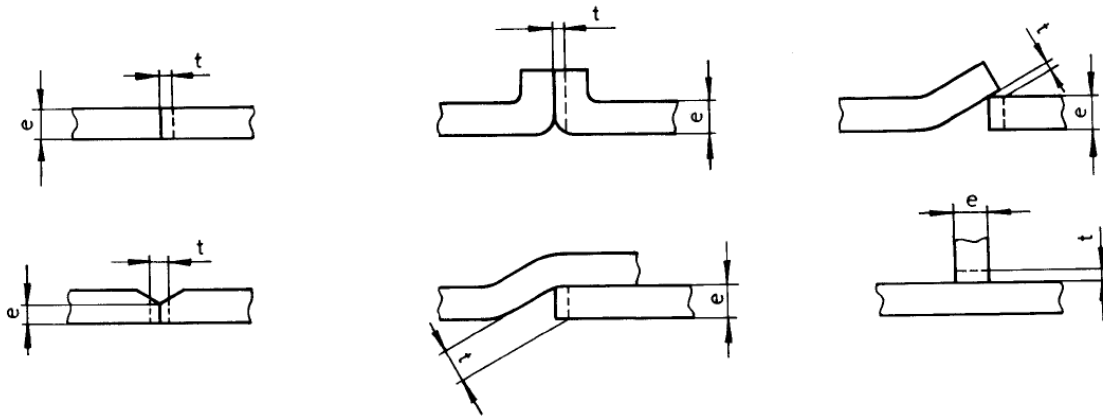


Figura 4-2. Apertura de encastre sin apertura [13]

Para los casos en los que exista una separación entre las juntas, habrá que tomar como referencia la figura 4-3 para identificar la apertura de encastre. La dimensión xx se refiere a la separación entre las juntas.

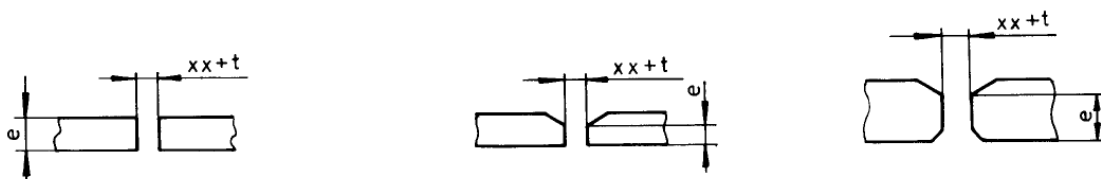


Figura 4-3. Apertura de encastre con apertura [13]

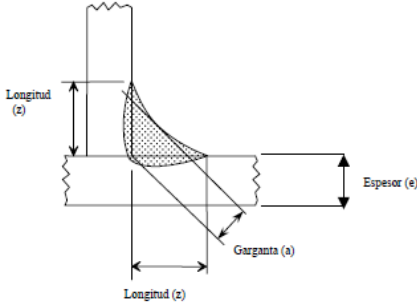
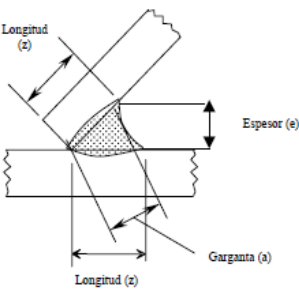
4.7 Soldeo

Será necesario sujetar las piezas para mantener la separación y alineación durante el soldeo. Una vez hecho esto, deberá encenderse el arco en un lugar de la misma junta, para evitar así las marcas de encendido y las quemaduras. El apagado se realizará mediante movimientos circulares efectuados por encima del baño de fusión, retirando rápidamente el electrodo hacia atrás sobre el cordón de soldadura y levantándolo a través de la escoria.

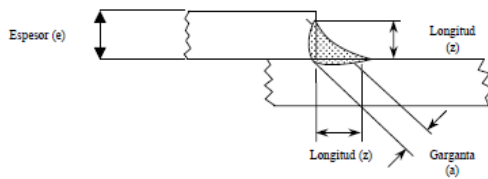
4.7.1 Soldadura en ángulo

En cuanto a las dimensiones del cordón de soldadura, para el proceso de soldeo en ángulo deberán respetarse las dimensiones de la tabla 4-12 en el caso de que no viniesen indicadas en su correspondiente plano.

Tabla 4-12. Valores de ancho de garganta y longitud en función del tipo de unión [13]

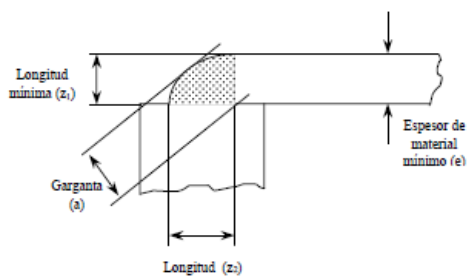
Tipo de unión	Garganta (a)	Longitud (z)
<p style="text-align: center;">Unión en T</p> 	$e \leq a \leq 1,2e$	$e \leq z \leq 1,4e$
<p style="text-align: center;">Unión en V</p> 	$e \leq a \leq 1,2e$	$e \leq z \leq 1,4e$

Unión solapada



$$0,6e \leq a \leq 1,2e \quad 0,7e \leq z \leq 1,4e$$

Unión en esquina



$$0,7e \leq a \leq 1,2e \quad z \geq e$$

4.7.2 Soldadura a tope

En la soldadura TIG el ancho del cordón de soldadura deberá ser lo menor posible para lograr la penetración completa, con un valor máximo de 15 mm de ancho.

Cuando la soldadura a tope se realice sobre piezas cuyos cantos estén levantados se requerirá una penetración completa, y el contorno deberá tener forma convexa y sobrepasar el espesor “e”, tal y como se indica en la figura 4-4.

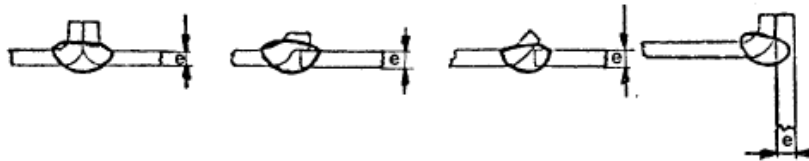


Figura 4-4. Tipo de contorno en soldaduras a tope con canto levantado [13]

Si la soldadura a tope se realiza a través de los dos lados, se deberá respetar la mínima penetración de solape (P en la figura 4-5), que será de un 25% de la dimensión “X” reflejada también en la figura 4-5, o bien valdrá 1,5 mm, la dimensión que sea menor.

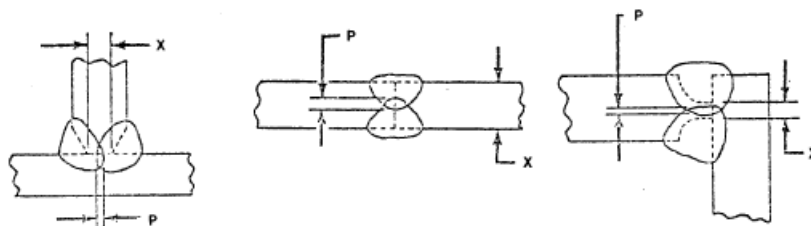


Figura 4-5. Penetración de solape en soldaduras a tope realizadas por ambos lados [13]

4.8 Limpieza final

Los materiales que posteriormente a la soldadura tengan que recibir un acabado orgánico, un tratamiento químico o electrolítico, o bien necesitan someterse a una inspección no destructiva, deberán verse sometidas a un tratamiento de limpieza como el que se describió en el apartado 4.3.4, teniendo en cuenta que antes del decapado será necesario eliminar la escoria residual. La eliminación de esta escoria deberá realizarse a través de un martilleado, seguido de un cepillado o un chorreado si los restos de escoria persisten.

Las decoloraciones producidas tras la soldadura no tendrán que ser eliminadas si son aceptables. Cuando no sean aceptables (Tabla 4-13) pero se permita su eliminación para la aceptación de la pieza soldada, es necesario rebajar un mínimo de 25 μm la zona superficial que abarque la decoloración.

Tabla 4-13. Decoloraciones aceptables en soldadura de titanio [13]

Clase de soldadura	Decoloración aceptable (En soldadura finalizada)	Decoloraciones no aceptables	
		En cordones intermedios	En cordones finales
A	Plata brillante Amarillento	Amarillento (1)	Violeta azul
B y C	Plata brillante Amarillento Violeta	Amarillento (1) Violeta (1) Azul	Azul (1)

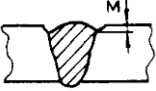
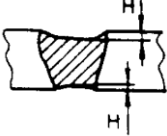
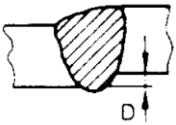
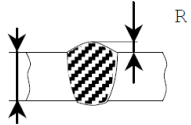
(1) Se acepta sólo si se elimina esta tonalidad con procedimientos mecánicos.

4.9 Criterios de aceptación y rechazo

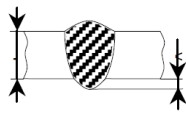
En este apartado se expondrán los criterios de aceptación y rechazo para soldaduras realizadas a tope, que serán las que usaremos para soldar nuestras probetas. En la tabla 4-14 se podrá observar la distinta defectología que aparece en las normas, habiéndose expuesto tanto las que se recogen en la norma militar como en la civil, ya que existen diferencias entre ambas en cuanto a los valores admisibles. Por lo que de acuerdo a I+D-P-181 y a AISP01-04-008, las imperfecciones que pueden aparecer en el proceso de soldadura son:

- Mordeduras.
- Hundimientos.
- Desnivelación.
- Excesivo material de soldadura.
- Excesiva penetración.
- Cavidad raíz.
- Ancho de soldadura
- Porosidad e incrustaciones superficiales.

Tabla 4-14. Criterios de aceptación y rechazo según norma militar [13]

Imperfecciones		Clase A	Clase B	Clase C
Mordeduras 	En toda la longitud de la soldadura (M máxima)	0,12 mm	1,5% e ó 0,12 mm, el que sea mayor	1,5% e ó 0,12 mm, el que sea mayor
	Individuales (M máxima)	$M \leq 0,1e$	$M \leq 0,2e$	$M \leq 0,3e$
	Longitud máxima acumulada en 75 mm de soldadura	5 mm	15 mm	25 mm
Hundimientos 	En toda la longitud de la soldadura (H máximo)	0,12 mm	1,5% e ó 0,12 mm, el que sea mayor	1,5% e ó 0,12 mm, el que sea mayor
	Individuales (H máxima)	$H \leq 0,1e$	$H \leq 0,2e$	$H \leq 0,3e$
	Longitud máxima acumulada en 75 mm de soldadura	5 mm	15 mm	25 mm
Desnivelación 		$D \leq 0,2e + 0,3 \text{ mm}$ ó $\leq 1,5 \text{ mm}$, el que sea menor	$D \leq 0,2e + 0,3 \text{ mm}$ ó 1,5 mm, el que sea menor	$D \leq 0,3e + 0,3 \text{ mm}$ ó $\leq 3,0 \text{ mm}$, el que sea menor
Excesivo material de soldadura				
	$e \leq 3 \text{ mm}$		$R \leq 0,5 e$	$R \leq 0,6 e$
	$e > 3 \text{ mm}$		$R \leq 1,5 e$	$R \leq 1,8 \text{ mm}$

Excesiva penetración



$e \leq 3$
mm

$R \leq 0.3 e + 0.7$ mm

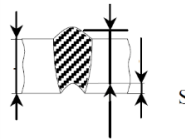
$R \leq 0.4 e + 0.85$
 $e \leq 3$ mm

$e > 3$
mm

$R \leq 1.6$ mm

$R \leq 2.0$ mm

Cavidad raiz

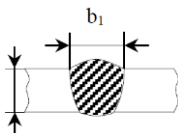


$S \leq 0.07 e$

$S \leq 0.2 e$

$S \leq 0.2 e$

Ancho de soldadura



$2e \leq b1 \leq 2.5e + 5$ mm

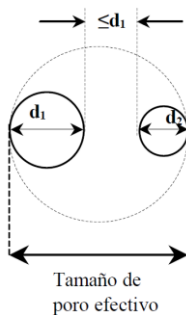
$b1 \geq 2e$

Porosidad e incrustaciones superficiales

Tamaño individual máximo

No permitida

$\leq 0.5e$ ó ≤ 2.3 mm, el que sea menor



Separación mínima (2)

No permitida

2 veces la longitud de la imperfección menor más próxima

Longitud máxima acumulada en 75 mm de soldadura (2)

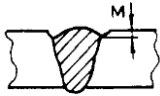
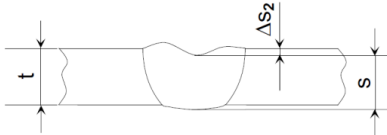
No permitida

10 poros por 50 mm longitud soldadura

Porosidad e incrustaciones superficiales¹⁰	Tamaño individual máximo	$\leq 0.3e$ ó ≤ 1.3 mm, el que sea menor	$\leq 0.5e$ ó ≤ 1.5 mm, el que sea menor	No limitada
	Separación mínima	3 veces la longitud de la imperfección menor más próxima	2 veces la longitud de la imperfección menor más próxima	No limitada
	Longitud máxima acumulada en 75 mm de soldadura ¹¹	$\leq 1.3 e$ ó ≤ 6.0 mm, el que sea menor	$\leq 2.0 e$ ó ≤ 9.0 mm, el que sea menor	No limitada

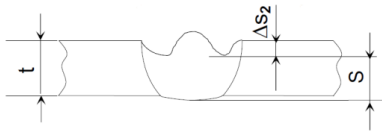
En la norma civil aparece la misma defectología, aunque en general es más restrictiva que la norma militar en este aspecto. El espesor en esta especificación vendrá definido por la letra “t”.

Tabla 4-15. Criterios e aceptación y rechazo según norma civil [18]

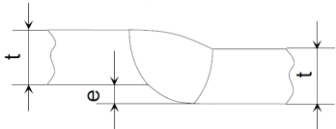
Imperfecciones	Clase A	Clase B	Clase C
Mordeduras			
	No permitido		$M \leq 0,3t$ ó $M \leq 1,8$ mm, la que sea menor
Hundimientos			
	$\Delta s2 \leq 0,1 t$ y $S \geq t$	$\Delta s2 \leq 0,2 t$ and $S \geq t$	$\Delta s2 \leq 0,3 t$ and $S \geq t$
Hundimientos en los extremos			

¹⁰ Criterio aplicable sólo cuando se realice inspección radiográfica.

¹¹ Si el espesor del material base es inferior a 1,6 mm poros inferiores a 0,05 mm no serán tenidos en cuenta. Si el espesor del material base es superior a 1,6 mm no se tendrán en cuenta poros inferiores a 0,15 mm ó 0,02 e, el valor que sea mayor.



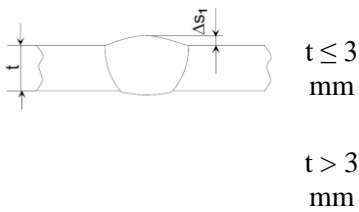
Desnivelación



$e \leq 0,2t + 0,3 \text{ mm}$ ó
 $e \leq 1,5 \text{ mm}$, el que sea
 menor. Siendo t el espesor del
 material más delgado

$e \leq 0,3t + 0,3 \text{ mm}$ ó
 $e \leq 3 \text{ mm}$, el que sea
 menor. Siendo t el
 espesor del
 material más
 delgado

Excesivo material de soldadura



$t \leq 3$
 mm

$\Delta s1 \leq 0,5t + 0,4 \text{ mm}$

$t > 3$
 mm

$\Delta s1 \leq 1,9 \text{ mm}$

Excesiva penetración



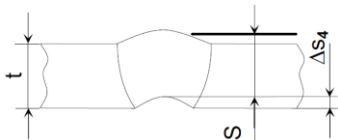
$t \leq 3$
 mm

$\Delta s3 \leq 0,5t + 0,4 \text{ mm}$

$t > 3$
 mm

$\Delta s3 \leq 1,9 \text{ mm}$

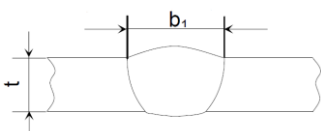
Cavidad raiz



$\Delta s4 \leq 0,1 t$
 y $S \geq t$

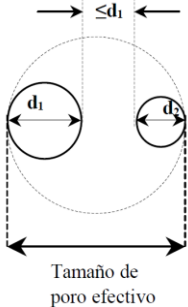
$\Delta s4 \leq 0,2 t$
 and $S \geq t$

Ancho de soldadura



$2 t \leq b1 \leq 2,5 t + 5 \text{ mm}$

$b1 \geq 2 t$

Porosidad e incrustaciones superficiales	Tamaño individual máximo	Porosidad no permitida	$\leq 0.5t$ ó ≤ 2.3 mm, el que sea menor
	Longitud máxima acumulada en 50 mm de soldadura	Porosidad no permitida	Máximo de 10 poros por 50 mm longitud soldadura

4.10 Inspecciones

Una vez finalizado el proceso de soldeo, dependiendo de la clase de soldadura que se haya llevado a cabo, será necesario realizar una serie de inspecciones no destructivas para comprobar el estado del material. Estas se pueden clasificar en:

- Inspecciones por partículas magnéticas.
- Inspecciones por líquidos penetrantes.
- Inspecciones radiográficas.
- Inspecciones ultrasónicas.

En la tabla 4-16 se ha elaborado un resumen sobre los tipos de inspecciones y su necesidad o no de ser aplicadas dependiendo de la clase de soldadura.

Tabla 4-16. Inspecciones no destructivas

CLASE DE SOLDADURA	ENSAYOS E INSPECCIONES DE PIEZAS SOLDADAS	OBSERVACIONES
A	Visual	
	Con Partículas Magnéticas o Líquidos penetrantes	Obligatorias
	Radiográfica	
	Ultrasonidos	Si lo requiere el plano o documento aplicable
	Otros (estanqueidad, probeta de adaptación, etc.)	
B	Visual	Obligatorias
	Con Partículas Magnéticas o Líquidos penetrantes	
	Radiográfica	10% ¹²
	Otros (estanqueidad, probeta de adaptación, etc.)	Si lo requiere el plano o documento aplicable
C	Visual	Obligatoria

¹² Se requiere confirmar íntegramente el proceso en el 10% de las piezas mediante inspección radiográfica. La frecuencia de inspección puede ser reducida progresivamente después de que se haya establecido y mantenido satisfactoriamente por Garantía de calidad la técnica de soldadura. La frecuencia de inspección será reducida si hay un incremento de imperfecciones que estén fuera de los requerimientos reseñados en Tabla 4-14 o solicitados por la Autoridad de Diseño de Airbus.

Con Partículas Magnéticas o
Líquidos penetrantes

Si lo requiere el plano
o documento aplicable

Otros (estanqueidad, probeta de
adaptación, etc.)

4.11 Reparaciones

A continuación, se exponen algunos de los requisitos a aplicar a las reparaciones según I+D-P 181 [13]:

- Las reparaciones serán realizadas con el mismo procedimiento y material de aporte con la que se realizó la soldadura inicial. También se permite realizarlas manualmente con GTAW y SMAW, si estos procedimientos son aplicables al material base.
- Si por causa de la reparación se producen grietas que penetren en el material base la pieza será rechazada.
- Antes de proceder a la reparación de los defectos observados en piezas soldadas, tratadas a niveles de alta resistencia, se procederá al recocido o revenido de las mismas hasta valores de dureza inferiores a 30 RC.
- Las imperfecciones superficiales detectadas por el operario durante la soldadura como mordeduras, hundimientos y cordones bajos de medida, pueden corregirse dando otro cordón sin necesidad de eliminar material.
- Los defectos revelados por inspección por partículas con líquidos penetrantes o radiográfica como poros, vacíos, incrustaciones, grietas en el cordón, etc., deben eliminarse por completo mediante mecanizado, siendo necesario antes de soldar nuevamente, la aprobación del inspector de soldadura.
- El número de reparaciones admisibles para cada clase de soldadura será
 - Clase I: Una reparación.
 - Clase II: Dos reparaciones.
 - Clase III: Tres reparaciones.

5 ENSAYOS MECÁNICOS

Se puede realizar un estudio sobre las propiedades mecánicas de los materiales a través de ensayos, gracias a los cuales podremos predecir el comportamiento del material cuando se encuentre en funcionamiento. En este trabajo realizaremos los ensayos de tracción, doblado y dureza, que son los que explicaremos a lo largo de este subcapítulo, y con los que conseguiremos conocer las propiedades de límite elástico, tensión de rotura, alargamiento de las uniones soldadas. También veremos las características que deberán tener las probetas con las que realizaremos los ensayos, para lo cual nos basaremos en lo expuesto en las normas UNE.

Cabe destacar también que existen muchos otros tipos de ensayos que también son útiles a la hora de estudiar las propiedades mecánicas de los materiales, como son los ensayos de impacto, de mecánica de la fractura, creep, etc., y que no se realizarán por los elevados recursos, tiempo y extensión que supondrían.

5.1 Ensayo de tracción.

El ensayo de tracción es el ensayo por excelencia debido a su sencillez y la fiabilidad de sus resultados. Básicamente consiste en someter a una muestra del material que se vaya a estudiar (con una forma y dimensiones normalizadas) a una fuerza de tracción axial creciente hasta la rotura del mismo. Durante la realización del ensayo se puede desprestigiar la acción de la inercia, y existe un equilibrio en todo momento entre la fuerza aplicada y la fuerza de reacción de la probeta.

La fuerza de tracción necesaria para estirar la probeta la produce la máquina mediante dispositivos mecánicos o hidráulicos. La máquina también deberá poseer mecanismos de auto alineación, para evitar que se produzcan momentos flectores en la probeta, de esta forma nos aseguramos de que el material estará sometido a una fuerza uniaxial.

Una vez se ejerce la fuerza F sobre la probeta, ésta produce un alargamiento de la misma, ΔL . La máquina de ensayos mide constantemente estos dos parámetros, representándolos mediante un gráfico. El alargamiento de la probeta va a su vez acompañado de una reducción en la sección transversal de la misma, no obstante, para los cálculos posteriores esta reducción de área se desprestigiará, y se usará siempre el área inicial de la probeta, S_0 .



Figura 5-1. Máquina de ensayo de tracción real [19]

Para emplear parámetros normalizados que no dependan de la fuerza aplicada o las dimensiones de la probeta se emplearán la tensión y el alargamiento unitario:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \qquad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Las propiedades obtenidas a partir del ensayo serán:

- Límite elástico.
- Tensión de rotura.
- Alargamiento.
- Estricción.
- Trabajo absorbido.

5.1.1 Límite elástico

Casi la totalidad de los metales presentan una curva tensión-deformación como la que se representa en la figura 5-2. Durante la parte lineal de la misma las deformaciones que se presenten serán elásticas, esto quiere decir que la deformación desaparece una vez se deja de aplicar la carga. Sin embargo, cuando se somete al material a una tensión lo suficientemente elevada, de manera que se llegue hasta la parte curvada, las deformaciones que se produzcan tendrán un carácter plástico, de tal forma que se produce una deformación permanente en el material. El valor de tensión a partir del cual se presentan deformaciones plásticas se representa por σ_E , al que se le conoce como límite elástico.

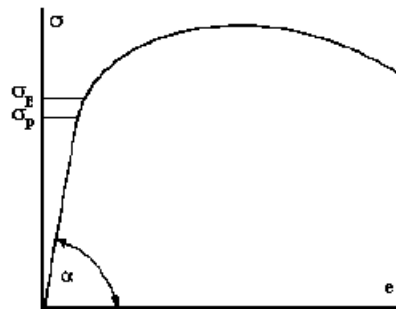


Figura 5-2. Curva tensión-deformación [22]

En la zona elástica se cumple la ley de Hooke, siendo la deformación proporcional a la tensión, de forma que:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Donde E es el módulo elástico, característica no dependiente de la estructura, y cuyo valor es la tangente del ángulo α que se muestra en la figura X:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \operatorname{tg}\alpha$$

En la práctica, el valor del límite elástico representa la tensión que provoca en el material una deformación permanente $\varepsilon=0,002$ (0,2%), y se hallará a través de la curva de tracción, tal y como se aprecia en la figura 5-3. Primero hallando el punto B, que se corresponderá a una elongación del 0,2%, y luego a partir de dicho punto trazando una paralela a la recta OA, que cortará a la curva en el punto C, y cuya ordenada D se corresponderá con el límite elástico convencional.

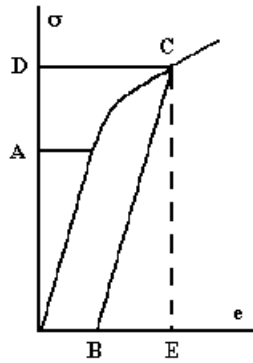


Figura 5-3. Determinación del límite elástico [22]

5.1.2 Tensión de rotura

Se define como tensión de rotura a la tensión a la cual el material rompe por ser sometido a un esfuerzo de tracción mayor al que puede soportar, este valor suele venir expresado por σ_R . Gracias al cálculo de este parámetro podremos conocer la ductilidad del material.

Si el material es frágil partirá en la zona elástica de la curva tensión-deformación, tal y como viene representado en la figura 5-4(A), siendo en este caso el valor de la tensión de rotura inferior al del límite elástico. Mientras que, si el material presenta una ductilidad baja, su curva de tracción será como la de la figura 5-4(B), rompiendo una vez se llega a la parte plástica, es decir en la parte curva de la gráfica. Por otra parte, también se puede dar el caso de la figura 5-4(C), rompiéndose la probeta ya en la parte descendente de la curva. Esto es debido a que, en los materiales dúctiles, al someterlos a esfuerzos de tracción grandes se produce una reducción de su sección reducida, por lo que la fuerza necesaria para provocar la deformación de la misma será menor que con la sección nominal.

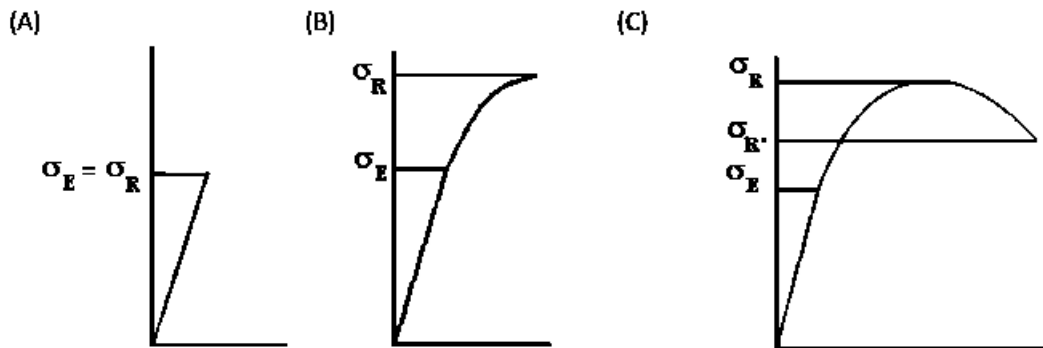


Figura 5-4. Tensión de rotura [22]

5.1.3 Alargamiento

El alargamiento representa la máxima extensión plástica que puede soportar un material antes de romperse, por lo que es una característica dúctil del material. Por lo tanto, basándonos en esta definición, su valor vendrá dado por:

$$\epsilon_R = \frac{L_R - L_0}{L_0}$$

Que expresado en tanto por ciento será el valor del alargamiento:

$$A = \frac{L_R - L_0}{L_0} \times 100 = 100\epsilon_R$$

5.1.4 Estricción

Cuando la probeta se tracciona hasta su rotura, su sección disminuye hasta S_R . La estricción es el valor de disminución de dicha sección expresada en tanto por ciento:

$$Z = \frac{S_0 - S_R}{S_0} \times 100$$

Si durante el ensayo el material sufre un alargamiento elevado y una estricción también elevada se dice que su comportamiento ha sido dúctil. Si por el contrario se produce la fractura sin que se aprecie ninguna deformación significativa en la probeta a nivel macroscópico, el comportamiento del material se considera frágil.

5.1.5 Trabajo absorbido o energía absorbida

La capacidad de un material para absorber una cierta cantidad de energía mientras que se carga y restituirla mientras se descarga se llama energía elástica. Se define como el trabajo absorbido por el material por unidad de volumen durante la deformación elástica, y equivale al área OAB de la figura 5-5.

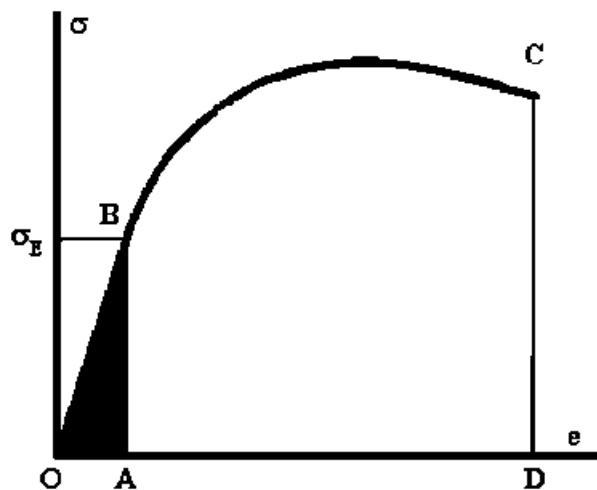


Figura 5-5. Energía absorbida [22]

Como se puede observar, los materiales que posean un elevado límite elástico y módulo elástico, poseerán también una energía elástica muy alta. La energía plástica de los materiales también la podremos hallar a partir de la curva tensión-deformación, siendo ésta la que equivale al área ADCB de la figura X. Representa a la capacidad del material de resistir tensiones superiores al límite elástico.

5.1.6 Especificaciones del ensayo

En este apartado se estudiarán los distintos elementos que componen el ensayo. Se ha seguido la norma americana AWS B2.1, debido a que los ensayos de tracción anteriores que se realizaron en Airgrup se basaron en dicha norma, logrando resultados válidos, por ello se prefiere realizar el ensayo en esas mismas condiciones.

5.1.6.1 Probetas

Las probetas a emplear podrán tener formas cilíndricas o prismáticas, habiéndose utilizado para los ensayos esta última por poseer un mecanizado más sencillo. En la figura 5-6 podrá verse la forma que tendrán los cupones, así como sus dimensiones límite.

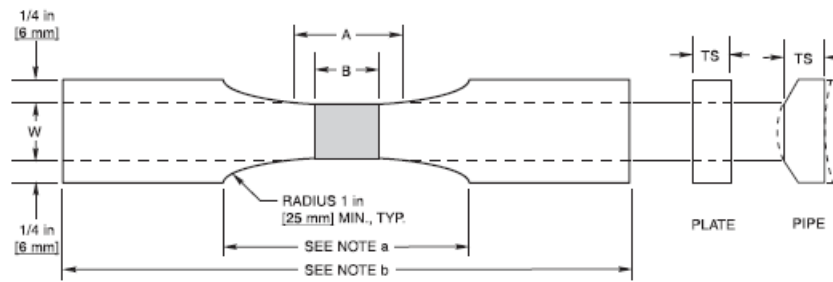


Figura 5-6. Diseño de las probetas para el ensayo de tracción [23]

- Esta longitud será la requerida por la máquina que se usará para el ensayo.
- La longitud de la sección A será igual a la dimensión B más 13 mm, con un valor mínimo de 57 mm.
- La longitud de W será de 19 mm para chapas.

5.1.6.2 Preparación de la máquina de ensayos

Si la máquina ha estado sometida a un largo periodo de inactividad, ésta deberá ser precalentada hasta la temperatura normal de operación, para minimizar los errores que puedan aparecer al trabajar en condiciones inestables de temperatura.

5.1.6.3 Sujeción de la probeta

La sujeción de la probeta deberá limitarse a la sección de sujeción, ya que, si agarramos por la sección reducida o el ángulo, los resultados de los ensayos podrían verse afectados significativamente.

El eje de probeta debe coincidir con la línea central de las cabezas de la máquina de prueba para evitar la introducción de tensiones de flexión. El extensómetro deberá ser montado en la probeta, y retirado una vez se alcance el límite elástico.

5.1.6.4 Velocidades de ensayo

En la norma ASTM-8E nos encontramos con distintas limitaciones de velocidad para la determinación del límite elástico o la resistencia a la tracción.

Para la determinación del límite elástico nos encontramos con tres métodos distintos de controlar la velocidad de la máquina:

- Método A: La velocidad de la máquina de ensayo deberá ser tal que la tensión soportada esté entre los 1,15 y los 11,5 MPa/s (entre 10.000 y 100.000 psi/min).
- Método B: En este método se usará el extensómetro para controlar la velocidad de la máquina de ensayos, de tal forma que la medida del mismo deberá estar en $0,015 \pm 0,006$ mm/mm/min.
- Método C: En este último se controlará la velocidad de la cruceta, debiendo estar el rango de $0,015 \pm 0,003$ mm/mm/min.

Para hallar la resistencia a la tracción se nos da un rango de velocidad diferente, de tal forma que la velocidad de la máquina deberá situarse entre los 0,05 y los 0,5 mm/mm/min.

5.1.6.5 Puesta a cero de la máquina de ensayo

La máquina de ensayo deberá ser configurada de modo que una indicación de fuerza cero signifique un estado de fuerza cero en la probeta. Cualquier fuerza o precarga impartida por las mordazas debe ser indicada por el sistema de medición a no ser que la precarga sea físicamente retirada.

5.2 Ensayo de dureza Rockwell

Se entiende como dureza a la resistencia que opone un material a ser penetrado superficialmente por otros cuerpos. Para medir este parámetro generalmente se pueden emplear tres tipos de ensayos:

- Ensayo de dureza Brinell.
- Ensayo de dureza Vickers.
- Ensayo de dureza Rockwell.

En este apartado se procederá a describir el ensayo Rockwell, que será el que emplearemos posteriormente para hallar la dureza de nuestras probetas. Este ensayo fue por primera vez llevado a cabo en 1929, ideado para materiales duros que no podían ser ensayados por el método Brinell.

5.2.1 Procedimiento

Este ensayo consistirá en una penetración del material a través de un penetrador cónico de diamante o un penetrador esférico de acero, siendo la secuencia de operaciones la señalada a continuación:

1. Aplicación de una fuerza preliminar F_0 , de 10 Kgf para el ensayo Rockwell, y de 3 Kgf para el ensayo Rockwell superficial, durante un determinado intervalo de tiempo, y medir a continuación la profundidad de la señal obtenida.
2. A la fuerza aplicada en 1) le sumamos otra fuerza F_1 , aplicándose entonces sobre el material una fuerza total F , que será la suma de F_1 y F_0 . Esta fuerza se aplicará durante un tiempo.
3. Retirada de la fuerza F_1 , aplicando solamente la fuerza F_0 durante un tiempo. Medir posteriormente la profundidad de la marca sobre la probeta.
4. Retirada de todas las fuerzas aplicadas sobre la probeta.

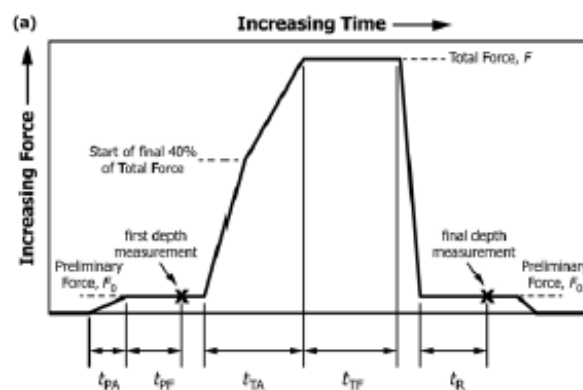


Figura 5-7. Diagrama de fuerzas aplicadas sobre la probeta en el ensayo Rockwell [24]

Como podemos observar durante el ensayo se pueden aplicar fuerzas preliminares, F_0 , de 3Kgf o de 10 Kgf. Por lo tanto, existirán dos tipos de deformaciones, obteniéndose dos clasificaciones generales para el ensayo de dureza Rockwell, el general y el superficial.

La dureza Rockwell se calcula a partir de la diferencia de profundidad de la huella que el penetrador deja durante el ensayo, teniendo en cuenta tanto el tipo de ensayo Rockwell como el tipo de penetrador usado. Esta huella se mide mediante un micrómetro que es accionado por el penetrador. Los valores de dureza Rockwell se obtendrían tal y como se indica en la tabla 5-1:

Tabla 5-1. Obtención de los valores de dureza Rockwell [24]

Penetrador esfero cónico de diamante	Rockwell	$100 - \frac{h}{0,002}$
	Rockwell superficial	$100 - \frac{h}{0,001}$
Penetrador de bolas de carburo tungsteno	Rockwell	$130 - \frac{h}{0,002}$
	Rockwell superficial	$100 - \frac{h}{0,001}$

Para hallar el valor medio de la dureza de una determinada probeta, \bar{H} , a partir una serie de mediciones, n, se emplea la siguiente fórmula:

$$\bar{H} = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + \dots + H_n}{n}$$

5.2.2 Especificaciones de los ensayos

Este ensayo se realizará también dentro de las instalaciones de Airgrup, por lo que identificaremos las especificaciones del ensayo según la norma que se utilice en la empresa, que en este caso es la norma americana ASTM E18.

5.2.2.1 Temperatura de los ensayos

Se recomienda realizar el ensayo dentro del rango de temperaturas que va desde los 20 a los 26 °C, y con una humedad menor al 30 %. Si estos parámetros se encuentran fueran de este rango se deberá registrar, a no ser que quede demostrado que no afecta a las mediciones.

5.2.2.2 Probetas

Para este ensayo no se especifica la forma o dimensiones de la probeta, la única restricción que aparece en la ASTM E18 es que el espesor de la pieza a ensayar sea de al menos 10 veces la profundidad de la penetración, de esta forma no debería ser visible ninguna deformación o marca en la parte trasera de la pieza una vez efectuado el ensayo, aunque su aparición no conlleva que los resultados sean incorrectos. También deberemos asegurarnos de que la superficie y la base de la pieza estén totalmente limpias y suaves antes de la ejecución del ensayo.

5.2.2.1 Fuerzas aplicadas

Para informar de un valor de dureza Rockwell no vale únicamente con señalar el valor numérico obtenido en el ensayo, sino que también es necesario indicar el tipo de penetrador que se ha utilizado y la fuerza total empleada. Esta información se puede conocer a través del símbolo de escala, que vendrá siempre acompañado del valor numérico de dureza Rockwell. A través de la tabla podremos comprobar a que símbolo de escala corresponde cada penetrador y fuerza total aplicadas.

Tabla 5-2 Símbolos de escala en el ensayo de dureza Rockwell [24]

Símbolo de escala	Penetrador	Fuerza total aplicada, Kgf	Aplicaciones típicas
B	Bola de carburo de tungsteno de 1,588 mm de diámetro	100	Aleaciones de cobre, aceros blandos, hierro maleable.
C	Diamante	150	Aceros, hierros fundidos duros, titanio y otros materiales con una dureza superior a B100
A	Diamante	60	Metales duros, aceros delgados y aceros endurecidos
D	Diamante	100	Aceros delgados y medio endurecidos
E	Bola de carburo de tungsteno de 3,175 mm de diámetro	100	Hierros fundidos, aleaciones de magnesio y aluminio, hierros maleables
F	Bola de carburo de tungsteno de 1,588 mm de diámetro	60	Aleaciones de cobre recocido, chapas de acero finas y blandas
G	Bola de carburo de tungsteno de 1,588 mm de diámetro	150	Hierros maleables, aleaciones de cobre-níquel-zinc y aleaciones de cobre-níquel
H	Bola de carburo de tungsteno de 3,175 mm de diámetro	60	Zinc y aluminio
K	Bola de carburo de tungsteno de 3,175 mm de diámetro	150	
L	Bola de carburo de tungsteno de 6,35 mm de diámetro	60	
M	Bola de carburo de tungsteno de 6,35 mm de diámetro	100	
P	Bola de carburo de tungsteno de 6,35 mm de diámetro	150	Metales antifricción y otros metales muy blandos o delgados
R	Bola de carburo de tungsteno de 12,7 mm de diámetro	60	
S	Bola de carburo de tungsteno de 12,7 mm de diámetro	100	
V	Bola de carburo de tungsteno de 12,7 mm de diámetro	150	

5.2.2.2 Parámetros a controlar

En la ASTM E18 aparece un rango de valores admisibles tanto para la velocidad del penetrador como para los tiempos de aplicación de las distintas fuerzas en las distintas etapas del ensayo. En la tabla podremos apreciar el rango de valores admisibles de estos parámetros.

Tabla 5-3. Tolerancias de los distintos parámetros [24]

Parámetro del ensayo	Tolerancia
Velocidad del penetrador recomendada	2,5 mm/s
Tiempo de aplicación de la fuerza preliminar, tpf. Cuando el tiempo de aplicación de la fuerza preliminar transitoria tpa 1seg, entonces calcular este parámetro como $tpa/2 + tpf$	0,1 a 4 seg
Tiempo de aplicación de la fuerza adicional	1 a 8 seg
Tiempo de aplicación de la fuerza total	2 a 6 seg
Tiempo de aplicación para la recuperación elástica	0,2 a 5 seg

5.2.2.3 Distancias mínimas entre mediciones

Las mediciones se realizarán en la cara calibrada. Al realizarse las mismas se deberá tener en cuenta la distancia entre mediciones anteriores y entre los bordes, debido a que estos parámetros podrían influir en los resultados obtenidos. De esta forma, se deberán respetar las distancias que aparecen en la figura.

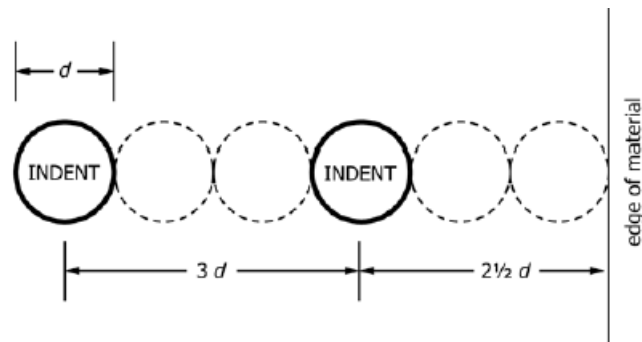


Figura 5-8. Distancias admisibles entre mediciones [24]

CAPÍTULO 2: ENSAYOS

6 PROCESO DE ADQUISICIÓN DE PROBETAS

El primer paso para dar comienzo con la parte práctica de este proyecto ha sido decidir el número de ensayos que se iban a realizar, definiendo así el número de cupones que se iban a emplear dependiendo del tipo de ensayo, y valorando el número de simulaciones de reparaciones que se iban a llevar a cabo. Una vez conocidos estos datos se ha podido definir tanto el número de chapas que han sido necesarias como sus dimensiones para conseguir el número de probetas deseadas con dimensiones normalizadas.

6.1 Características de las chapas adquiridas en ensayos de tracción y dureza

Para el ensayo de tracción, dado a que es el que mejor representa como varían las propiedades mecánicas del titanio tras las reparaciones, se hacía necesario tener un elevado número de probetas para conseguir unos resultados fiables. Por ello se decidió que se hacía necesario un mínimo de seis probetas por cada tipo de simulación de reparaciones, lo que definía la anchura de las probetas que necesitábamos.

En cuanto al número de simulaciones que se iban a realizar, finalmente se decidió realizar hasta un máximo de 5 reparaciones, lo que se hacía necesario la adquisición de 12 chapas:

- Dos chapas para soldadura óptima.
- Dos chapas para soldadura óptima más una reparación.
- Dos chapas para soldadura óptima más dos reparaciones.
- Dos chapas para soldadura óptima más tres reparaciones.
- Dos chapas para soldadura óptima más cuatro reparaciones.
- Dos chapas para soldadura óptima más cinco reparaciones.

Las dimensiones mínimas de estas chapas debían ser de 226 x 204 mm para que las seis probetas que se fueran a conseguir a partir de las chapas tuvieran las dimensiones adecuadas. En la figura 1-1 podemos observar el modelo 3D de una de estas chapas realizada a través del programa CATIA V5:

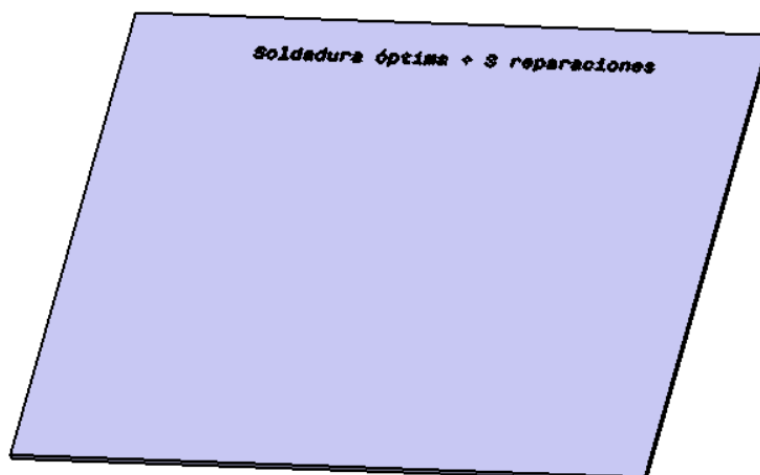


Figura 6.1. Modelo de chapa marcada elaborado con CATIA V5

Para facilitar el proceso por parte de los operarios que realizarían la soldadura se marcó con láser en cada una

de las chapas el número de reparaciones que se realizarían. Este marcado también servía como referencia para definir los lados que se debían soldar (siempre paralelamente a las letras identificativas y en el lado opuesto de la chapa).

Para las simulaciones de reparaciones parciales se emplearon chapas más pequeñas, de dimensiones 226 x 122 mm, ya que, aunque las probetas tendrían las mismas dimensiones que las definidas anteriormente, solo se ensayarían dos probetas por cada simulación.

6.2 Proceso de soldeo

Una vez mecanizadas todas las chapas con las dimensiones deseadas se llevó a cabo el soldeo por TIG de las mismas dentro de las instalaciones de Airgrup siguiendo los siguientes pasos:

1. **Limpieza previa al soldeo:** Se lleva a cabo una limpieza manual de cada una de las chapas usando disolvente MEC para que la superficie del material quede totalmente limpia. Además, se repasan los bordes que se van a soldar para eliminar la rebaba.
2. **Punteo previo:** Este un paso de preparación al soldeo que consiste en soldar las chapas por varios puntos sin utilizar material de aporte para que los bordes queden unidos antes de realizarse la soldadura final en la cámara inerte.



Figura 6.2. Proceso de punteo sin usar material de aporte

3. **Soldadura en cámara inerte:** Una vez conozcamos el material de aporte, el diámetro de las varillas y la intensidad con la que vamos a trabajar, se introducirán tanto las chapas como las varillas en la cámara inerte y se comenzará con el soldeo de las mismas.



Figura 6.3. Operario realizando el soldeo en cámara inerte

4. **Simulación de las reparaciones:** Una vez las chapas estén soldadas será necesario eliminar el cordón mediante un fresado para simular una reparación.

A)



B)



Figuras 6.4 A y B. Eliminación del cordón de soldadura para simular la reparación

5. **Eliminación de los sobre espesores:** Una vez estén todas las simulaciones de reparaciones requeridas terminadas, se procederá con el repaso del cordón para dejar la pieza plana y así cumplir con los requisitos de las especificaciones sobre el ensayo de tracción.

6.2.1 Parámetros de soldeo

Se emplearon los siguientes parámetros para el soldeo de las placas, cumpliendo los requisitos de la especificación I+D-P-181:

- Soldadura en cámara inerte.
- Gas de protección: Argón.

- Metal de aportación: AMS 4956.
- Diámetro del electrodo: 2,4 mm.
- Corriente empleada: Corriente continua a 70 A (para las placas de 2 mm de espesor la intensidad se tuvo que aumentar a 100 A para que calara la soldadura en la cara opuesta).
- Posicionamiento de las juntas: tope-tope.

6.3 Dimensiones de las probetas

Posteriormente al soldeo se realiza el corte por láser de las chapas para dar como resultado las probetas definitivas que se utilizarán para los ensayos. Para conseguir unas probetas normalizadas se han seguido las instrucciones de la norma AWS B2.1, cuyos requisitos se exponían en el capítulo 5.1 de este mismo documento.

En la siguiente figura podremos observar las dimensiones de las probetas fabricadas.

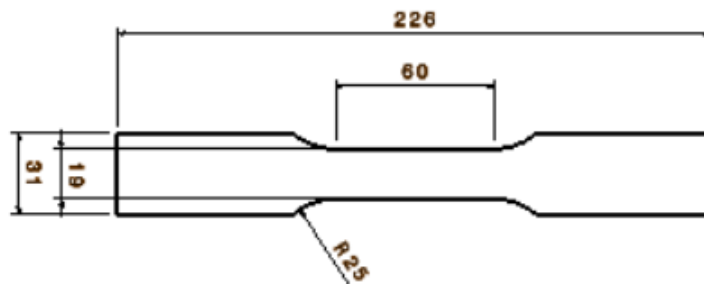


Figura 6.5. Plano con dimensiones de las probetas resultantes

6.4 Designación de las probetas

Para identificar las probetas una vez se realicen los ensayos hemos empleado la siguiente nomenclatura:

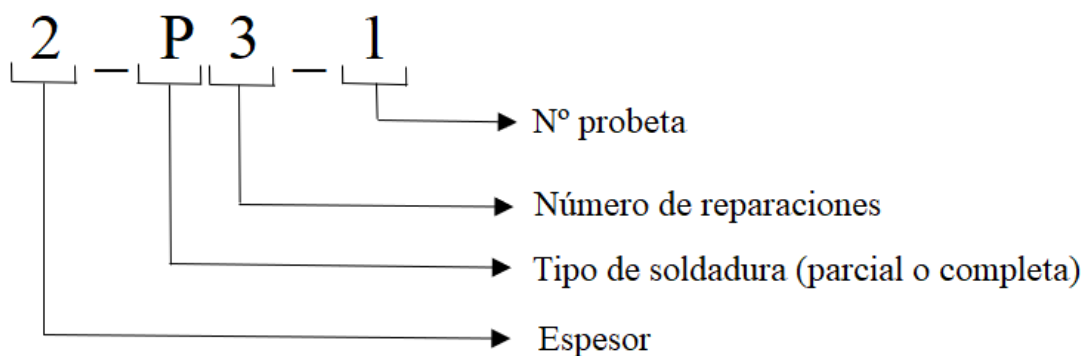


Figura 6.6. Nomenclatura empleada para identificar las probetas

7 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS

7.1 Metodología

Debido a la importante dispersión que se presentaba en varias de las muestras ensayadas se ha decidido emplear el método del puntaje Z para eliminar aquellos valores que presenten un resultado muy alejado de la media y que por lo tanto pueden resultar cuestionables. El valor de Z se establece a través de la siguiente ecuación:

$$Z_i = \frac{x_i - X}{\sigma}$$

Donde:

- x_i es el valor del participante.
- X es el valor medio de la muestra.
- σ es la desviación típica de la muestra.

Este método está aprobado por la norma internacional UNE EN-ISO 17043:2010, que establece que:

- Si $|Z_i| < 2$ el resultado es aceptable.
- Si $2 \geq |Z_i| \geq 3$ el resultado es cuestionable.
- Si $|Z_i| > 3$ el resultado es insatisfactorio.

Por lo que se ha decidido que todos los resultados que presenten un valor de Z superior a 2 no sean incluidos para el cálculo de los valores medios, aunque una vez finalizado el cálculo de todos los valores Z se ha detectado que no había ninguno fuera del rango de aceptación.

7.2 Resultados de los ensayos de tracción y discusión de los resultados

A continuación, se ilustrarán los resultados de los ensayos de tracción, gracias a los cuales podremos visualizar las modificaciones en resistencia y ductilidad a las que se ven sometidas las probetas dependiendo del número de reparaciones que se lleven a cabo en la soldadura, del espesor del material y de si se ha realizado una reparación “completa”, a través de toda la longitud del cordón, o “parcial”, eliminando solo una parte de la longitud del cordón para simular la reparación. Se expondrán los resultados de resistencia a la rotura y del límite elástico (en MPa) como parámetros representativos de la resistencia del material tras ejecutarse la soldadura, mientras que el alargamiento (%) se empleará para ilustrar su ductilidad.

7.2.1 Probetas de 1 mm de espesor sometidas a reparaciones completas

Para el caso de las probetas de 1 mm de espesor sometidas a reparaciones completas hemos obtenido los siguientes resultados a partir de una muestra de 6 probetas representativas de cada casuística:

Tabla 7-1. Resultados del ensayo de tracción para soldadura completa de 1 mm de espesor

Nº de reparaciones	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
Óptima	818,89	900,31	3,97	Cordón de soldadura
1 reparación	700,51	843,57	3,72	Cordón de soldadura

2 reparaciones	554,66	771,64	3,36	Cordón de soldadura
3 reparaciones	572,33	736,31	3,4	Cordón de soldadura
4 reparaciones	410,28	486,63	3,13	Cordón de soldadura
5 reparaciones	375,36	568,83	3,53	Cordón de soldadura

Podemos apreciar una significativa disminución de la resistencia a la tracción conforme se van aumentando las reparaciones, siendo el caso más desfavorable el correspondiente a 4 reparaciones, situación en la que se ha producido una disminución de un 45,94% en la carga de rotura del material. En cuanto a la ductilidad es importante destacar la gran caída en la misma ya para el caso de la soldadura óptima, si la comparamos con los valores de alargamiento del metal base, que según la hoja de características del material se encuentra en un 10%, por lo que se produce una caída en la ductilidad de un 60,3% de la soldadura óptima con respecto al material base. Aunque la caída en el alargamiento es menos pronunciada que en el caso de la resistencia conforme aumentan las reparaciones, de forma que se produce solamente una caída de un 21,2% en la misma para el caso más desfavorable. A partir de las gráficas correspondientes a las figuras 7-1 y 7-2 podremos apreciar visualmente todo lo comentado.

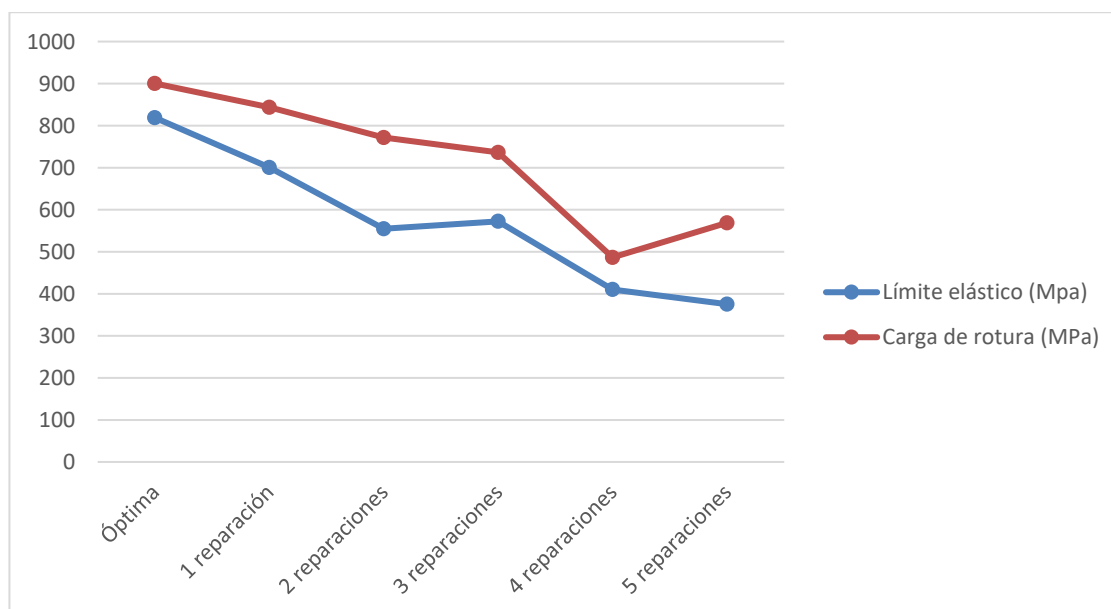


Figura 7-1. Resultados de resistencia para soldadura completa de 1 mm de espesor

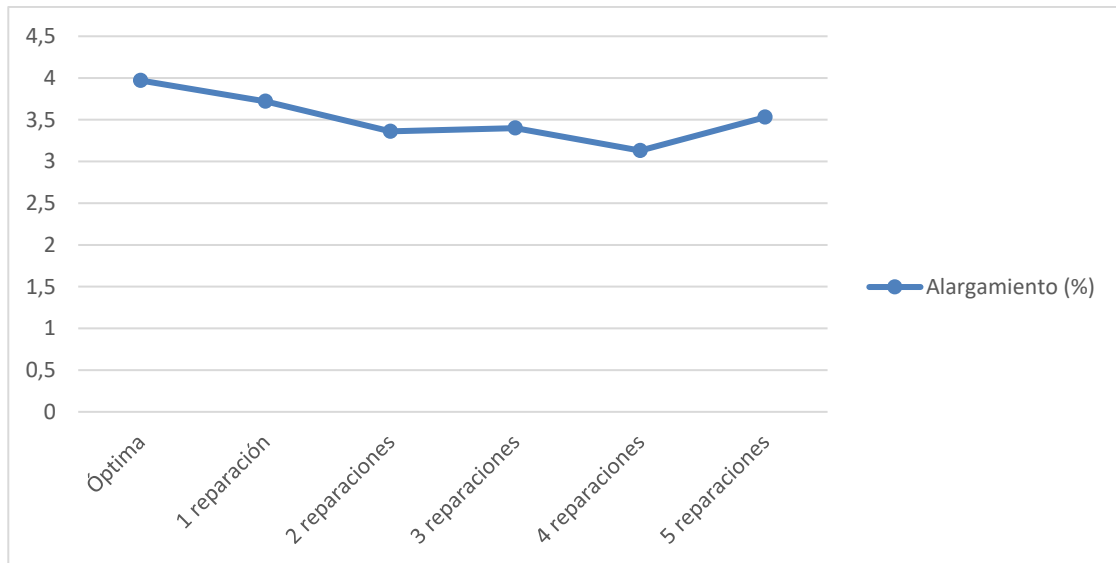


Figura 7-2. Resultados de ductilidad para soldadura completa de 1 mm de espesor

Durante el soldeo de estas probetas se detectaron deformaciones en las chapas, que se “doblaban” alrededor del cordón de soldadura debido al calor generado en el proceso, estas deformaciones se hacían más pronunciadas conforme se aumentaban las reparaciones. Debido a esto se hacía necesario un conformado posterior para dejar las probetas lo más rectas posibles, lo cual se consiguió, pero se provocó una depresión en la zona del cordón, con aparentes cambios de espesor tal y como se muestra en la figura 7-1.



Figura 7-3. Deformaciones ocasionadas por la soldadura en una probeta sometida a 2 reparaciones

Como podemos ver se forman dos railes alrededor del cordón. La zona de rotura de todas probetas se sitúa en los railes mencionados, tal y como podremos comprobar en las imágenes del Anexo 2, y que coinciden con la zona de unión del cordón con el metal base, donde podemos interpretar que se sitúa la zona de mayor fragilidad. Estas deformaciones van aumentando con el número de reparaciones, aunque ya se encuentran presentes en la soldadura óptima, y podrá ser una de las razones por las que se produce una caída tan brusca en la carga de rotura del material, la cual es mucho más suave en el caso de las probetas de 2 mm de espesor, donde las deformaciones producidas son menores tal y como veremos en el siguiente apartado. Otro dato más a destacar es la gran variabilidad de los datos obtenidos para cada casuística, produciéndose desviaciones típicas en la carga de rotura que van desde los 127,12 MPa hasta los 198,98 MPa.

7.2.2 Probetas de 2 mm de espesor sometidas a reparaciones completas

Para el caso de las probetas de 2 mm de espesor sometidas a reparaciones completas hemos obtenido los siguientes resultados a partir de una muestra de 6 probetas representativas de cada casuística:

Tabla 7-2. Resultados del ensayo de tracción para soldadura completa de 2 mm de espesor

Nº de reparaciones	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
--------------------	-----------------------	-----------------------	------------------	----------------

Óptima	882,26	1012,91	5,31	Material base
1 reparación	796,09	999,88	5,03	Material base
2 reparaciones	729,47	897,61	4,47	Cordón de soldadura
3 reparaciones	667,92	890,34	4,32	Cordón de soldadura
4 reparaciones	679,47	837,61	3,84	Cordón de soldadura
5 reparaciones	691,22	805,89	3,8	Cordón de soldadura

Para este caso en primera instancia podemos observar cómo los valores para la soldadura óptima tanto de resistencia como de ductilidad son más elevados que para el caso de las probetas de espesor 1 mm. De hecho, tanto para el caso de soldadura óptima como para el de una reparación se aprecia una carga de rotura superior a la del metal base, con un incremento respecto al mismo del 9,4 % en el caso de la soldadura óptima. En cuanto a la ductilidad, sí se aprecia una caída significativa del alargamiento respecto al material base, reduciéndose en un 46,9 %, siendo aun así este descenso menos pronunciado que en el caso de las probetas de 1 mm de espesor. En las figuras 7-4 y 7-5 podremos observar la evolución de las propiedades de resistencia y ductilidad conforme aumentan las reparaciones.

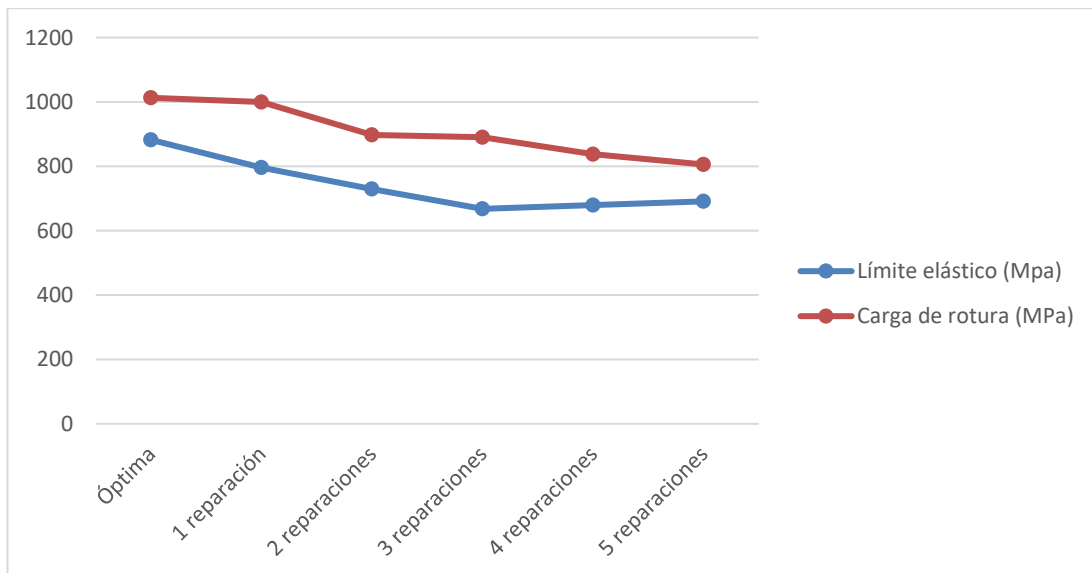


Figura 7-4. Resultados de resistencia para soldadura completa de 2 mm de espesor

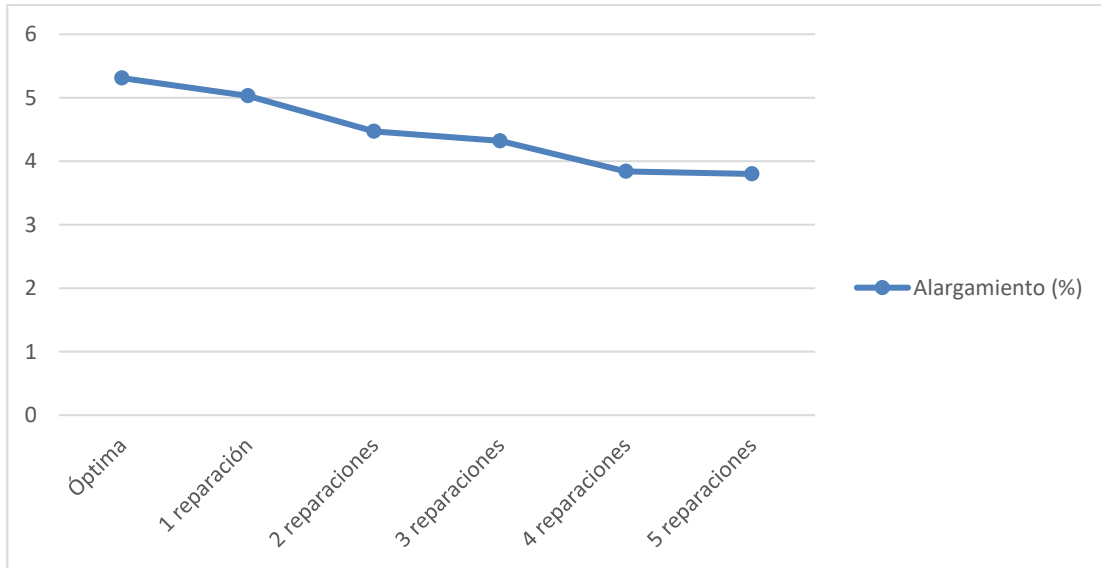


Figura 7-5. Resultados de ductilidad para soldadura completa de 2 mm de espesor

Se puede apreciar una caída menos significativa en las propiedades de resistencia con el aumento de las reparaciones, con una disminución del 20,4 % en la carga de rotura de las probetas con 5 reparaciones respecto a la soldadura óptima. También es importante destacar que la rotura de las probetas sometidas a una reparación o en las cuales se simuló una soldadura óptima, se produjo la carga de rotura por el material base en lugar de por la zona de unión del cordón con el metal base como ocurrió con el resto de probetas ensayadas. Esta mejora de propiedades respecto a las probetas de 1 mm puede deberse a la menor deformación producida durante el soldeo, tal y como podemos comprobar en la figura 7-6, donde mostramos una de las probetas que no ha sido afectada por ninguna reparación, en la que podemos apreciar un acabado mucho más uniforme que el mostrado en la figura 7-3 para probetas de 1 mm de espesor. Sin embargo, conforme el número de reparaciones aumenta, se incrementa también las deformaciones en la chapa por el aumento del calor aportado, esto provocó que se tuvieron que ensayar probetas sin estar completamente rectas (figura 7-7) debido a la gran dificultad para conformarlas por el elevado springback del titanio.



Figura 7-6. Geometría de una probeta que no ha sido sometida a ninguna reparación



Figura 7-7. Geometría de una probeta sometida a 5 reparaciones

Estas deformaciones más suaves que en el caso de las probetas de 1 mm de espesor pueden ser también la causa de que se consiguieran unos resultados con una variabilidad mucho mejor. En cuanto a la ductilidad, queda comprobado que es el parámetro que más disminuye con respecto al metal base, consiguiéndose un mejor resultado de alargamiento del 5,31% para el caso de la soldadura sin ninguna reparación, parámetro que está un 46,9 % por debajo del registrado para el metal base. La caída en el alargamiento resulta más significativa que en el caso de las probetas de 1 mm de espesor, aunque esto también puede ser debido a que

los valores de ductilidad en el caso de la soldadura óptima son ya bastante más elevados que los conseguidos en las probetas de 1 mm de espesor.

7.2.3 Probetas de 1 mm de espesor sometidas a reparaciones parciales

Para el caso de las simulaciones de reparaciones parciales se realizaron reparaciones de 65 mm de longitud sobre probetas con una anchura total de 122 mm, obteniéndose los siguientes resultados sobre una muestra de dos probetas para cada casuística:

Tabla 7-3. Resultados del ensayo de tracción para probetas sometidas a reparaciones parciales 1 mm de espesor

Nº de reparaciones	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
1 reparación	705,795	891,59	2,74	Cordón de soldadura
2 reparaciones	535,16	880,18	2,6	Cordón de soldadura
3 reparaciones	442	562,79	2,44	Cordón de soldadura
4 reparaciones	398,03	483,47	2,3	Cordón de soldadura
5 reparaciones	422,95	544,82	1,88	Cordón de soldadura

Al igual que en el caso de la soldadura completa para piezas de 1 mm de espesor, nos encontramos, en el caso de la probeta sometida a una reparación, con valores de resistencia a la tracción ligeramente inferior al metal base, y con todas las probetas rompiendo por el cordón de soldadura, concretamente entre la zona de unión entre el cordón de soldadura y el material base. En cuanto a los valores de ductilidad también vemos que se cumple el patrón de una disminución muy significativa en este parámetro, ya en el caso de pocas reparaciones, si lo comparamos con los valores de alargamiento del metal base.

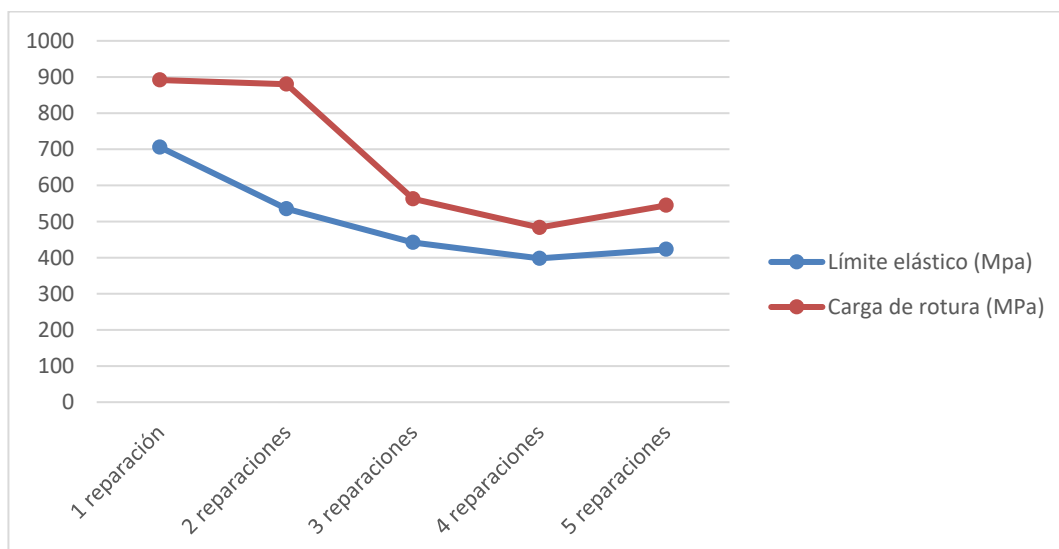


Figura 7-8. Resultados de resistencia para probetas de 1 mm de espesor sometidas a reparaciones parciales

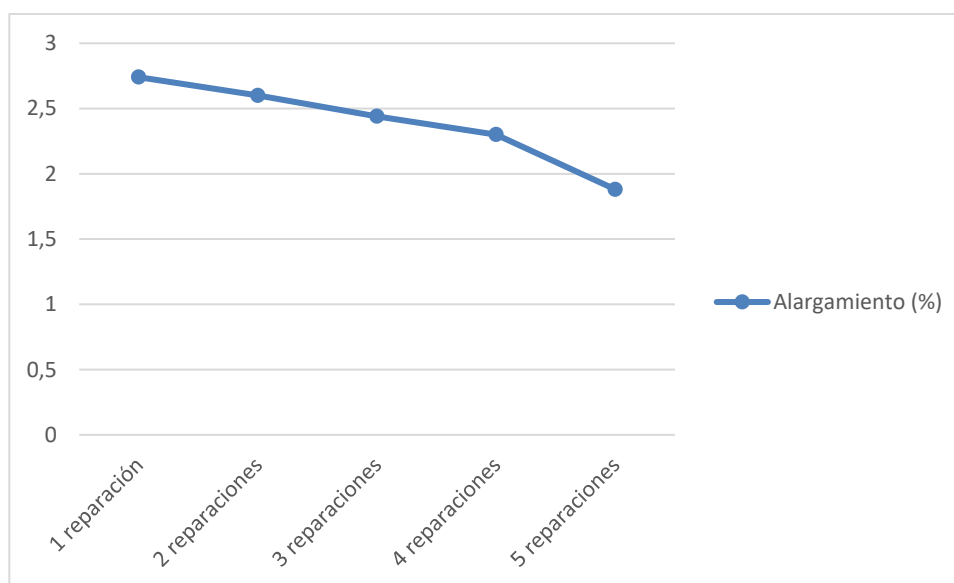


Figura 7-8. Resultados de ductilidad para probetas de 1 mm de espesor sometidas a reparaciones parciales

En cuanto a la evolución de las características mecánicas con las reparaciones, éstas no presentan mucha diferencia respecto a las reparaciones completas, ya que al igual que en éstas, se producen las peores características mecánicas en el caso de 4 reparaciones, con una caída en la carga de rotura de un 39 % en este caso comparándolo con las probetas sometidas a una reparación (la caída de la carga de rotura en este caso para las reparaciones completas es del 42,31 %). En cuanto a la ductilidad, los peores resultados se dan tras 5 reparaciones, produciéndose una caída del 31,4 % comparándolo con el caso de 1 reparación.

7.2.4 Probetas de 2 mm de espesor sometidas a reparaciones parciales

Al igual que en las probetas de 1 mm de espesor se realizaron reparaciones de 65 mm de longitud sobre probetas con una anchura de 122 mm obteniéndose los siguientes resultados a través de una muestra de 2 probetas para cada casuística:

Tabla 7-4. Resultados del ensayo de tracción para probetas sometidas a reparaciones parciales 2 mm de espesor

Nº de reparaciones	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
1 reparación	835,73	957,27	4,85	Cordón de soldadura
2 reparaciones	831,68	948,85	4,68	Cordón de soldadura
3 reparaciones	826,94	876,89	3,6	Cordón de soldadura
4 reparaciones	727,74	860,16	3,03	Cordón de soldadura
5 reparaciones	716,67	849,17	3,05	Cordón de soldadura

En este caso, a diferencia de las probetas sometidas a reparaciones completas, en el caso de 1 reparación, nos encontramos con que la carga de rotura se encuentra 42,61 MPa por debajo de su casuística equivalente en el caso de reparaciones completas, provocando que, a diferencia de en esta última, la rotura de probeta se produzca en la zona del cordón de soldadura. Los datos del alargamiento son también algo inferiores que los obtenidos para las reparaciones parciales en el caso de las probetas sometidas a 1 reparación, con un alargamiento un 0,18 % menor en estos casos. En las figuras 7-9 y 7-10 podremos observar la evolución de las características conforme aumentan el número de reparaciones.

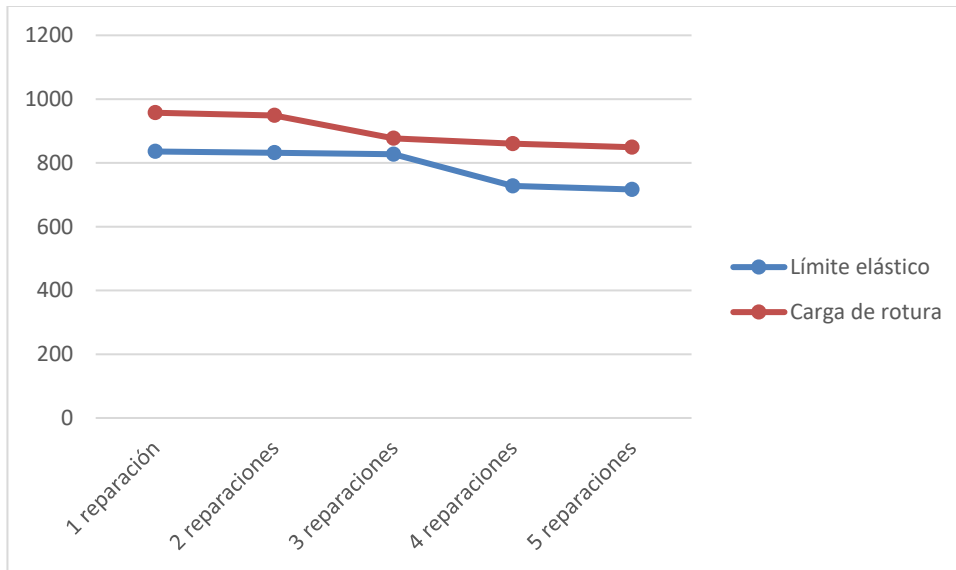


Figura 7-9. Resultados de resistencia para probetas de 2 mm de espesor sometidas a reparaciones parciales

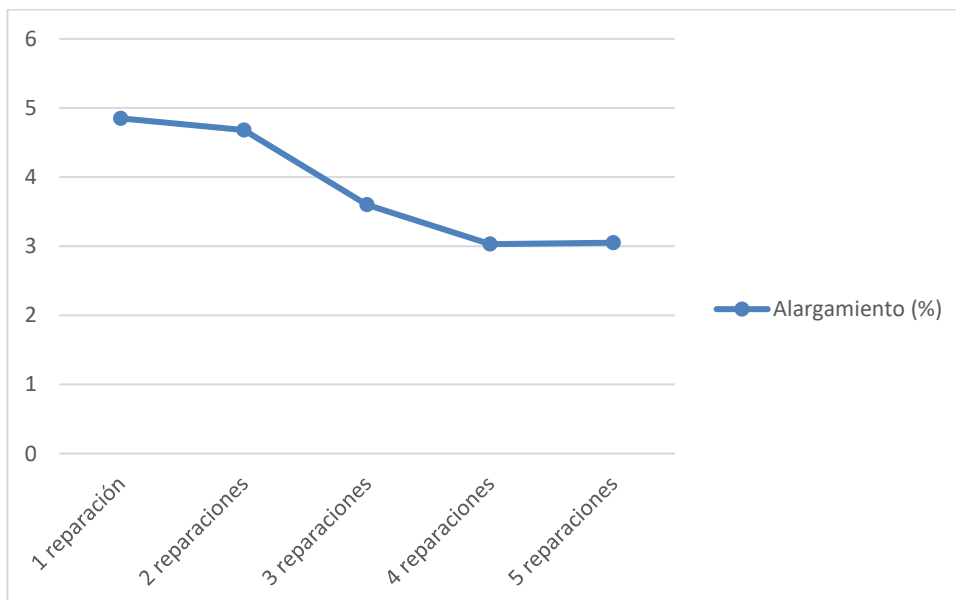


Figura 7-10. Resultados de ductilidad para probetas de 1 mm de espesor sometidas a reparaciones parciales

Como podemos apreciar la caída de las propiedades de resistencia vuelve a ser menos pronunciada que en el caso de las probetas de 1 mm de espesor, tal y como ocurría con las piezas sometidas a reparaciones completas. La caída de la carga de rotura respecto al material sometido a una reparación es del 11,3% comparado con la caída del 19,4% de la soldadura sometida a reparaciones completas de 2 mm de espesor. La caída en la ductilidad es muy similar a la ocasionada durante las reparaciones completas, ya que el alargamiento cae un 37,11 %, a diferencia del 24,45% que cae en el caso de las reparaciones completas. Esto se debe a que, en los casos de 3, 4 y 5 reparaciones se producen resultados de alargamiento bastante más bajos en los casos de las probetas sometidas a las reparaciones parciales que en las afectadas por reparaciones completas.

7.3 Resultados de los ensayos de dureza y discusión de los resultados

Para observar si se producen cambios de dureza debido a la ZAT se han realizado en una muestra de dos probetas por casuística dos medidas de la dureza en unidades Rockwell B para distintas distancias al centro del

cordón de soldadura (todos los cordones tenían una anchura de 10 mm). Se ha decidido registrar los resultados para 7 distancias diferentes, 6 de ellas separadas 2,5 mm entre sí, respetando la distancia mínima entre mediciones requerida por la ASTM E-18, y por último una medida con los valores de dureza del material base. A continuación, se muestran los resultados para las probetas de 1 mm de espesor:

Tabla 7-5. Resultados de dureza en Rockwell B para las probetas de 1 mm de espesor

PROBETAS	REPARACIONES COMPLETAS						
	DISTANCIA DE LAS MEDICIONES AL CENTRO DEL CORDÓN (MM)						
	6	8,5	11	13,5	16	18,5	MB
Soldadura óptima	107,15	107,2	107,25	107,7	107,7	107,75	107,8
Soldadura óptima + 1 reparación	107,5	105,65	107,05	107,25	107,15	107,5	107,75
Soldadura óptima + 2 reparaciones	107,05	106,5	107,7	106,05	106,95	107,95	107,8
Soldadura óptima + 3 reparaciones	107	106,9	106,7	107,75	107,95	107,45	107,65
Soldadura óptima + 4 reparaciones	107,1	104,9	106,25	107,5	107,5	107,45	107,6
Soldadura óptima + 5 reparaciones	106,25	105,8	107,5	107,65	107,7	107,7	107,85
REPARACIONES PARCIALES							
Soldadura óptima + 1 reparación	107,5	105,65	107,05	107,25	107,15	107,5	107,55
Soldadura óptima + 2 reparaciones	107,05	106,5	107,7	106,05	106,95	107,95	107,8
Soldadura óptima + 3 reparaciones	107	106,9	106,7	107,75	107,95	107,45	107,6
Soldadura óptima + 4 reparaciones	106,5	104,9	106,25	107,5	107,5	107,45	107,5
Soldadura óptima + 5 reparaciones	106,25	105,8	107,5	107,65	107,7	107,7	107,8

En la tabla 7-6 se mostrarán los resultados correspondientes a las probetas de 2 mm de espesor:

Tabla 7-6. Resultados de dureza en Rockwell B para las probetas de 2 mm de espesor

REPARACIONES COMPLETAS							
PROBETAS	DISTANCIA DE LAS MEDICIONES AL CENTRO DEL CORDÓN (MM)						
	6	8,5	11	13,5	16	118,5	MB
Soldadura óptima	109,15	109,2	109,25	108,7	108,4	107,75	107,7
Soldadura óptima + 1 reparación	108,7	109,45	108,65	108,2	108,3	107,85	107,75
Soldadura óptima + 2 reparaciones	109	108,15	107,95	108,05	108	107,85	107,75
Soldadura óptima + 3 reparaciones	108,45	108,5	108,15	108,15	108,2	107,65	107,75
Soldadura óptima + 4 reparaciones	109,45	108	108,3	107,85	108,5	107,55	107,65
Soldadura óptima + 5 reparaciones	108,1	108,5	107,9	108,15	108,15	107,65	107,75
REPARACIONES PARCIALES							
Soldadura óptima + 1 reparación	108,7	108,35	108,5	107,9	108,15	107,55	107,75
Soldadura óptima + 2 reparaciones	109,05	108,6	108,4	108,6	108,15	107,7	106,1
Soldadura óptima + 3 reparaciones	108,45	107,55	108,6	107,7	108	107,35	107,4
Soldadura óptima + 4 reparaciones	108,5	108,45	107,9	107,6	108,15	107,7	107,6
Soldadura óptima + 5 reparaciones	109,3	108,35	107,4	108,1	108,5	106,6	107,3

Se puede apreciar que no existe una variación en la dureza del material dependiendo del punto en el que se mida, obteniéndose desviaciones mínimas entre los valores de dureza medidos en la ZAT a 1 mm del cordón de soldadura y los registrados en el material base, con diferencias que suelen oscilar entre 1 y 2 puntos Rockwell B. Tampoco se aprecian grandes diferencias en las medidas de dureza una vez se aumenta el número de reparaciones, lo cual nos hace pensar que el aporte térmico originado por la soldadura no tiene demasiada influencia a la hora de variar la dureza del titanio. A continuación, se muestran las figuras 7-11 a 7-14, donde el lector podrá comprobar visualmente esta evolución:

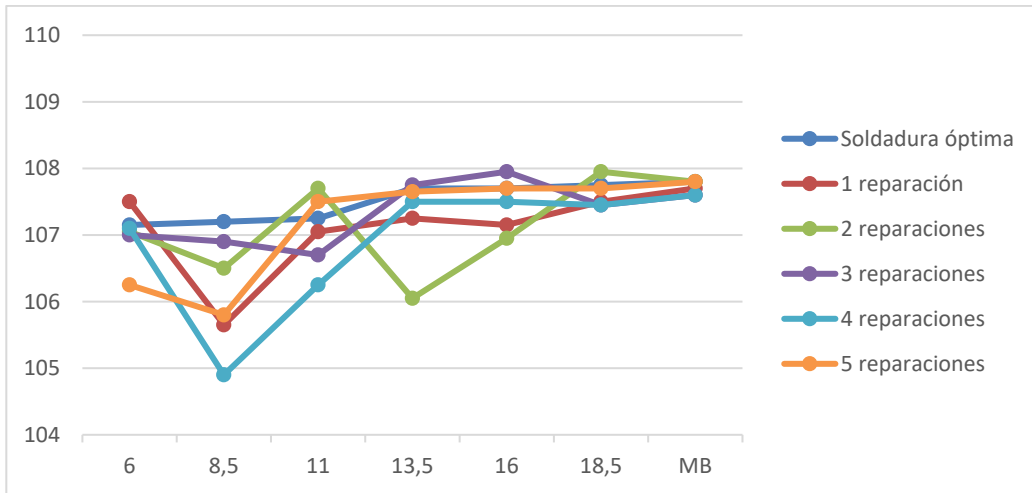


Figura 7-11. Evolución de la dureza para distinto número de reparaciones completas de 1 mm de espesor

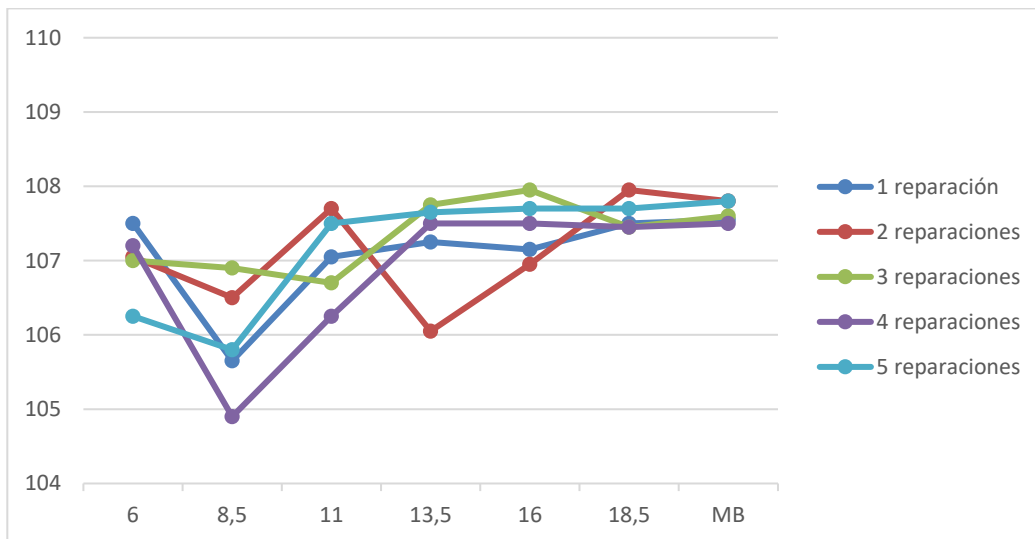


Figura 7-12. Evolución de la dureza para distinto número de reparaciones parciales de 1 mm de espesor

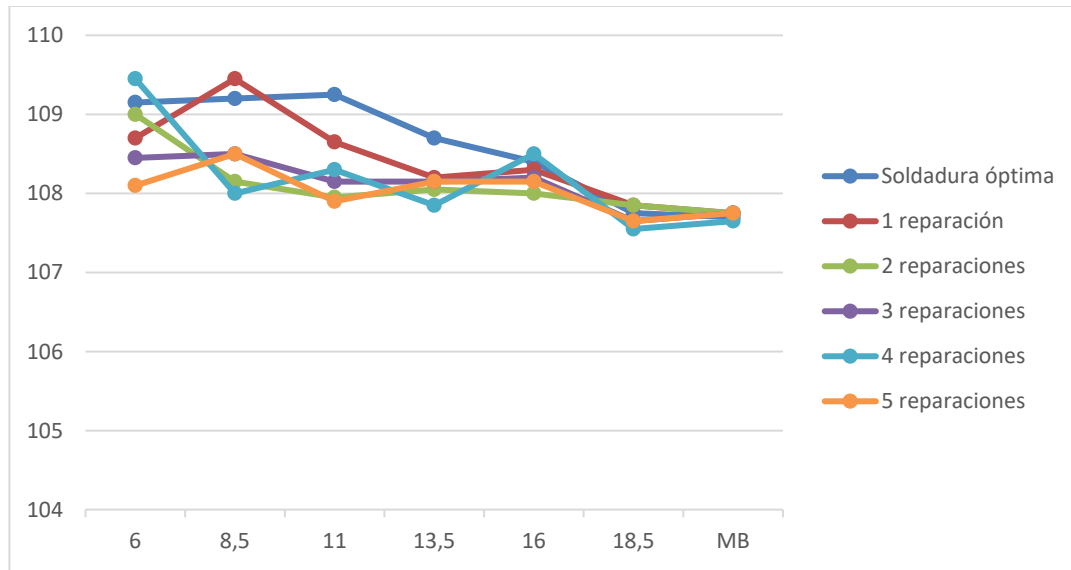


Figura 7-13. Evolución de la dureza para distinto número de reparaciones completas de 2 mm de espesor

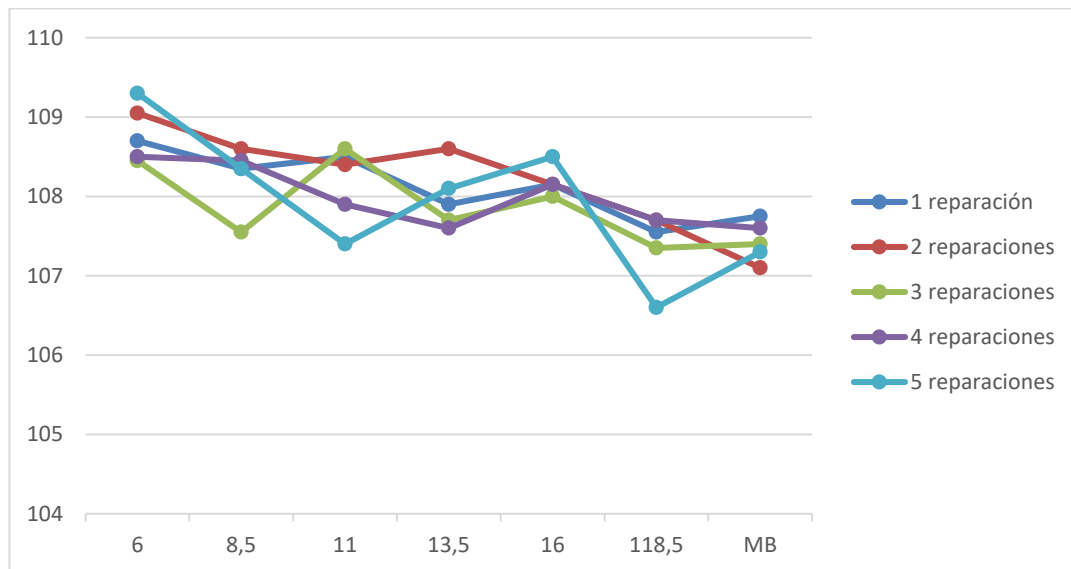


Figura 7-14. Evolución de la dureza para distinto número de reparaciones parciales de 2 mm de espesor

Se puede apreciar que las líneas de dureza dan resultados muy similares para todas las casuísticas, no apreciándose ningún patrón diferencial entre la soldadura sometida a reparaciones parciales y las sometidas a reparaciones completas. Entre los dos espesores la única diferencia apreciable es que en las probetas de 1 mm la dureza de la ZAT es siempre ligeramente inferior a la del metal base, mientras que en las probetas de 2 mm de espesor se produce el efecto contrario, aunque la diferencia es siempre mínima, por lo que cabe suponer que el material no se ve demasiado afectado por este efecto. Cabe destacar también la estabilización de los resultados conforme nos vamos alejando de la zona afectada térmicamente, obteniéndose mayor dispersión de los resultados e de dureza en la ZAT.

8 CONCLUSIONES

Durante este capítulo entraremos a valorar los resultados obtenidos de los ensayos de tracción y dureza, analizando los cambios que se producen en las propiedades mecánicas conforme aumentan el número de reparaciones. Además, se comparan los resultados obtenidos dependiendo del tipo de reparación llevado a cabo (reparación parcial o completa) y del espesor del material, además de analizar posibles continuaciones del estudio.

Durante los ensayos de tracción lo primero que llama la atención y que será necesario tener en cuenta cuando se realicen futuras reparaciones es la considerable diferencia de resultados obtenidos para las probetas de 1 mm y las de 2 mm de espesor. Si comparamos los resultados de la soldadura óptima con respecto a las propiedades del metal base, podremos observar que la resistencia del material apenas se ve alterada con el proceso de soldeo, obteniéndose para las probetas de 2 mm de espesor incluso un valor de carga de rotura ligeramente más elevado en el caso de la soldadura óptima que el obtenido en el material base sin soldar (un 4,9% más elevado). Sin embargo, sí se produce una caída importante en la ductilidad ocasionada por la soldadura, con una caída del 46,9% para el caso de la soldadura óptima formada por material base de espesor 2 mm, y una caída en la medida del alargamiento del 60,3% respecto al metal base.

La evolución de las características mecánicas con las reparaciones también se ve muy influenciado por el espesor del material, siendo este factor mucho más determinante para la repercusión que puedan tener las reparaciones que si éstas se realizan a través de toda la longitud del cordón de soldadura o de solamente una parte del mismo. De esta forma, se produce una caída en las propiedades mecánicas de la unión soldada del 45,94% en las probetas de 1 mm de espesor para el caso más desfavorable, mientras que esta caída cae a menos de la mitad para las probetas de 2 mm de espesor, siendo este dato del 20,4%. Para el caso de las probetas sometidas a reparaciones parciales, hemos obtenido resultados dispares, ya que en las probetas de 1 mm de espesor se han obtenido en general mejores resultados que en las uniones sometidas a reparaciones completas, sin embargo, ha ocurrido lo contrario para las probetas de 2 mm de espesor.

También hay que destacar la posible influencia que han podido tener las deformaciones en los resultados. Estas deformaciones deberán tenerse en cuenta cuando sean necesarias las reparaciones, ya que van aumentando conforme se va incrementando el número de las mismas debido a que se aumenta el calor aportado al material. Por lo tanto, se hace necesario un conformado posterior al soldeo para devolver a la unión a su forma original. Este conformado es más fácil de conseguir en las chapas de 1 mm de espesor, sin embargo, debido a esto las probetas quedan deformadas, tal y como se muestra en el apartado 7.2, y provocándose también la rotura de 3 de las probetas antes del ensayo. En las chapas de 2 mm se produjeron deformaciones algo menos pronunciadas, sin embargo, en aquellas chapas que fueron sometidas a un número alto de reparaciones y por lo tanto terminaron con deformaciones importantes, se hizo imposible devolver las probetas a su estado original debido al elevado springback del Ti-6Al-4V, lo que nos obligó a tener que ensayarlas sin estar totalmente rectas.

En cuanto al ensayo de dureza, no se han apreciado cambios considerables en la misma ni entre las casuísticas diferentes ni entre las líneas de dureza diferentes de una misma probeta. Esto contrasta con los resultados obtenidos en el Trabajo Fin de Máster de Marco Isidoro [28] donde se aprecia una significativa disminución de la dureza en la ZAT respecto al material base. Estas discrepancias podrían ser debidas a que el titanio requiere de temperaturas mucho más altas para su tratamiento térmico, y, aunque el Ti-6Al-4V es tratable térmicamente, sus propiedades mecánicas no se ven tan influenciadas por el aporte de calor como en el caso de las aleaciones de aluminio.

8.1 Posible continuación del estudio

Tras observar los resultados obtenidos se plantean algunas alternativas para poder continuar con el estudio:

1. Realización de ensayos de fluencia en caliente para valorar como afectan las reparaciones en las condiciones típicas de trabajo del Ti-6Al-4V.
2. Realización de ensayos de doblado como complemento a los ensayos de tracción para tener una mejor

visibilidad sobre la evolución de la ductilidad en el material.

3. Estudio metalográfico con el fin de conocer los cambios estructurales del titanio con la soldadura.
4. Estudiar los efectos de las reparaciones en otras tipologías de uniones (ángulo, solape, etc.)
5. Comprobar como varían las propiedades mecánicas con la modificación de los parámetros de soldadura en el titanio.
6. Realizar un alivio de tensiones posterior al soldeo y conformado para comprobar si se reducen de esta forma las variaciones en las propiedades mecánicas al aumentar el número de reparaciones.

REFERENCIAS

- [1] Curso de formación de Ingenieros Internacionales de Soldadura, Tema 1.1 Introducción general a la tecnología del soldeo, aspectos generales, Diciembre 2012
- [2] Curso de formación de Ingenieros Internacionales de Soldadura, Tema 1.2 Soldero Oxigás y Procesos Afines, Diciembre 2012.
- [3] Curso de formación de Ingenieros Internacionales de Soldadura, Tema 1.4 Arco eléctrico, Diciembre 2012.
- [4] Horwitz, Henry, *Soldadura, aplicaciones y práctica*
- [5] Curso de formación de Ingenieros Internacionales de Soldadura, Tema 1.12.4 Soldero por láser, Diciembre 2012.
- [6] M.Á. Esteban, *Soldadura TIG parte 2*, Sevilla: Airgrup, Mayo 2012.
- [7] Curso de formación de Ingenieros Internacionales de Soldadura, Tema 1.7 Soldero TIG, Diciembre 2012.
- [8] Elementos, << www.elementos.org>>, [En línea]. Available: <https://elementos.org/es/titanio> [Último acceso: Noviembre 2018].
- [9] Curso de formación de Ingenieros Internacionales de Soldadura, Tema 2.21 Titanio y otros metales y aleaciones, Febrero 2013.
- [10] Alatríste Luna, *El titanio y sus aleaciones*
- [11] www.aerospacemetals.com, <<www.aerospacemetals.com>>, [En línea]. Available: <http://www.aerospacemetals.com/titanium-distributor.html>
- [12] Cristoph Leyens, Manfred Peters (2001), *Titanium and titanium alloys*.
- [13] Airbus DS, I+D-P-181, 2007
- [14] American Welding Society, AWS A5.16, 2013
- [15] American Welding Society, AWS A5.12, 2009
- [16] Airbus DS, I+D-P-090, 2016
- [17] Airbus DS, I+D-P-033, 2009
- [18] Airbus S.A.S, AIPS01-04-008, 2012
- [19] Ibertest, <<www.ibertest.es>>, [En línea]. Available: <https://www.ibertest.es/products/cabezales-traccion-ib154-maquinas-ensayo-electromecanica/>
- [20] Curso de formación de Ingenieros Internacionales de Soldadura, Tema 2.21 Titanio y otros metales y aleaciones, Febrero 2013.
- [21] Curso de formación de Ingenieros Internacionales de Soldadura, Otros metales de interés tecnológico y sus aleaciones.
- [22] Curso de formación de Ingenieros Internacionales de Soldadura Tema 23.- Ensayos Mecánicos y su Aplicación a la Caracterización de Uniones Soldadas, Febrero 2013.
- [23] American Welding Society ,AWS B2.1
- [24] ASTM-8E
- [25] F. C. Campbell (2016) *Manufacturing technology for aerospace structural materials*
- [26] N. Eswara Prasad, R. J. H. Wanhill, *Aerospace Materials and Material Technologies. Volume 1: Aerospace Materials*.
- [27] Mouritz, Adrian P. *Introduction to Aerospace Materials*.

[28] M. Isidoro (2018) Trabajo Fin de Máster, *Estudio de la relación de los parámetros de soldadura con la defectología ocasionada y las propiedades mecánicas de los materiales.*

ANEXO I: IMÁGENES DE LAS PROBETAS ENSAYADAS A TRACCIÓN

Soldadura óptima (espesor = 1 mm)



Soldadura óptima + 1 reparación completa (espesor = 1 mm)



Soldadura óptima + 2 reparaciones completas (espesor = 1 mm)



Soldadura óptima + 3 reparaciones completas (espesor = 1 mm)



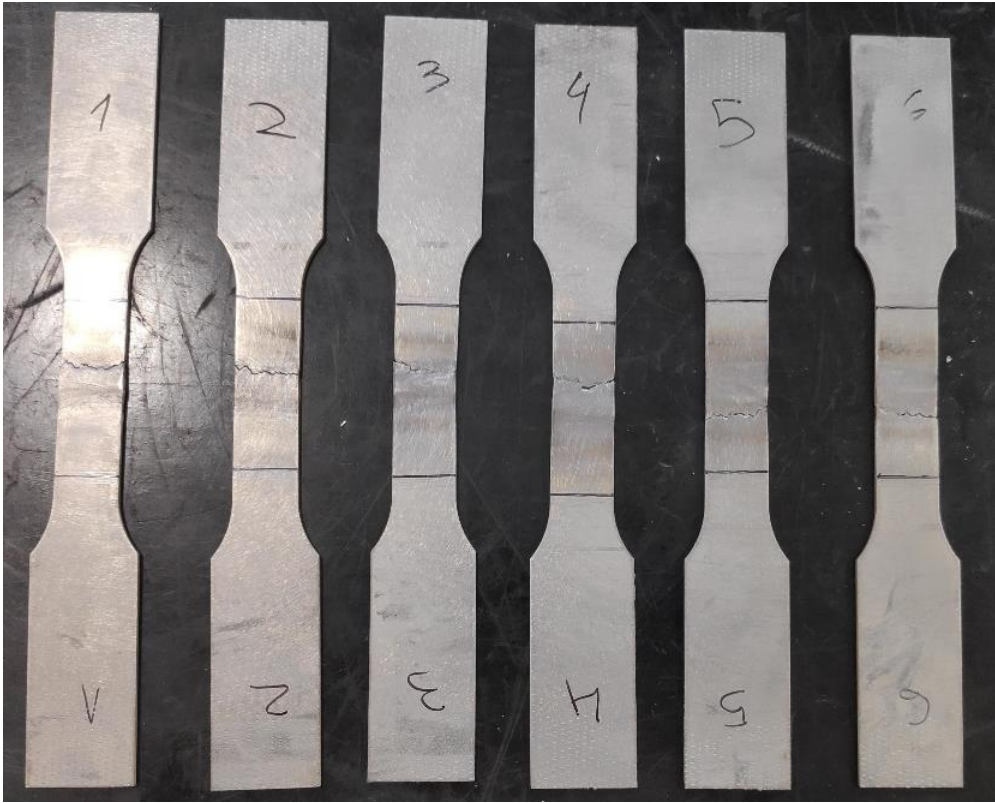
Soldadura óptima + 4 reparaciones completas (espesor = 1 mm)



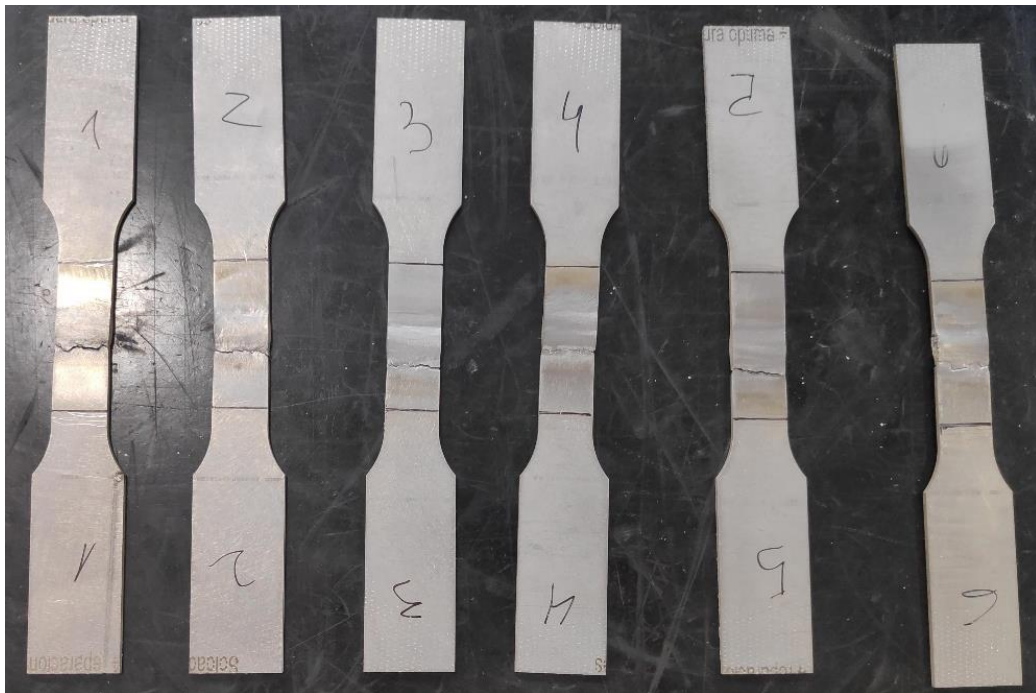
Soldadura óptima + 5 reparaciones completas (espesor = 1 mm)



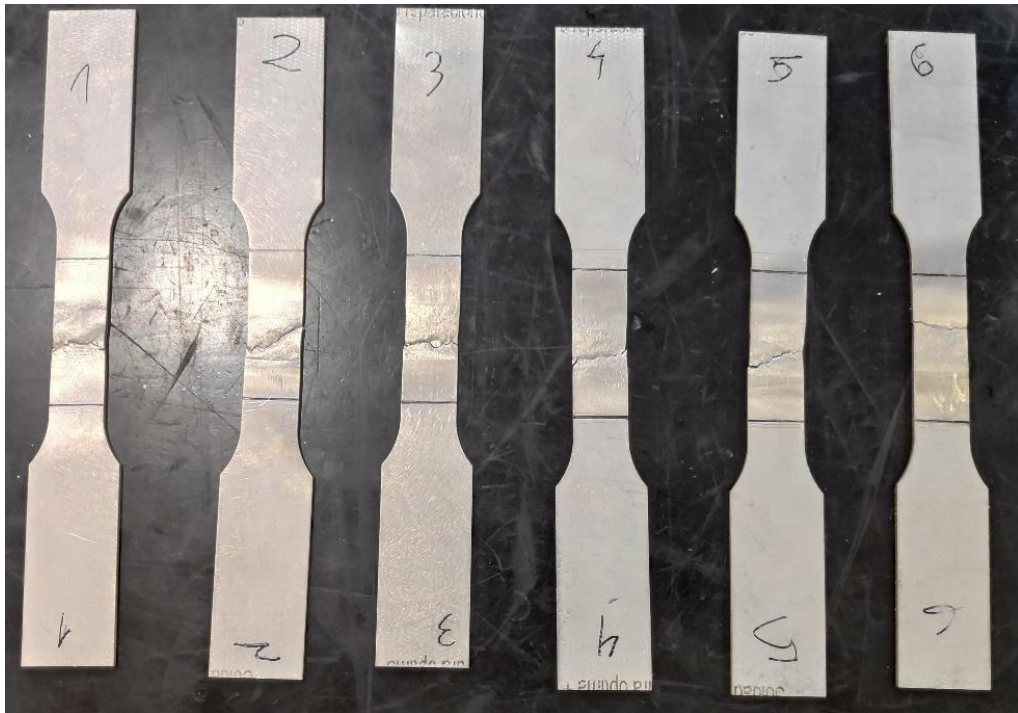
Soldadura óptima (espesor = 2 mm)



Soldadura óptima + 1 reparación completa (espesor = 2 mm)



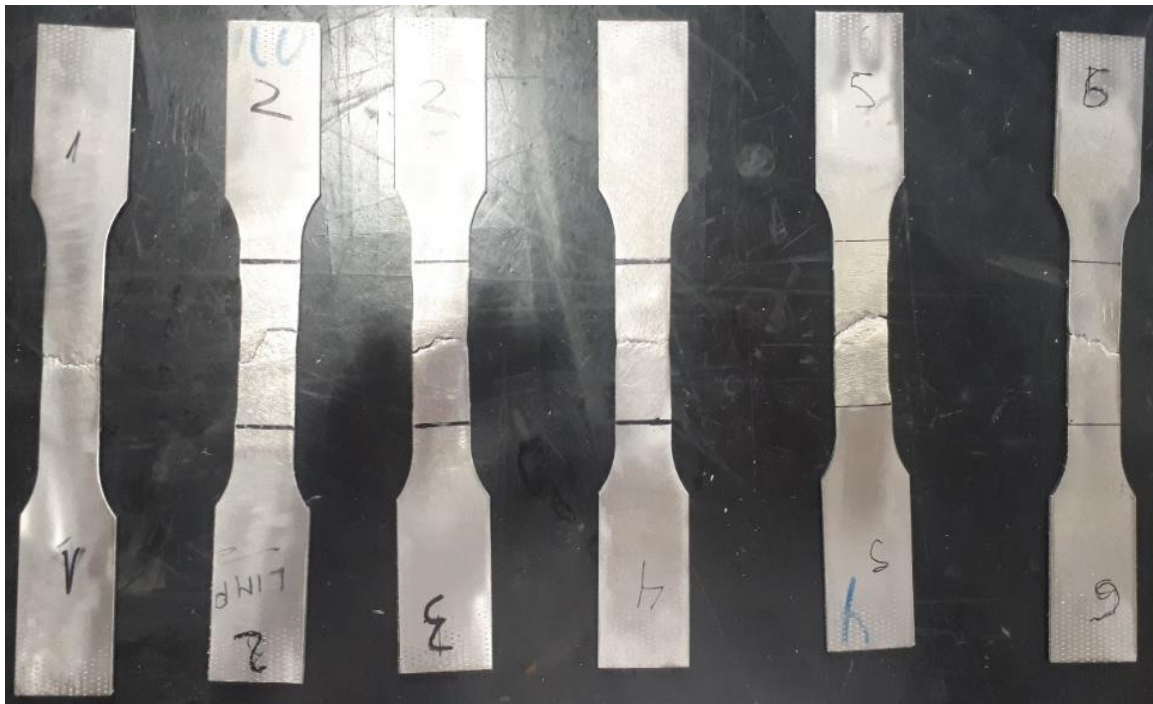
Soldadura óptima + 2 reparaciones completas (espesor = 2 mm)



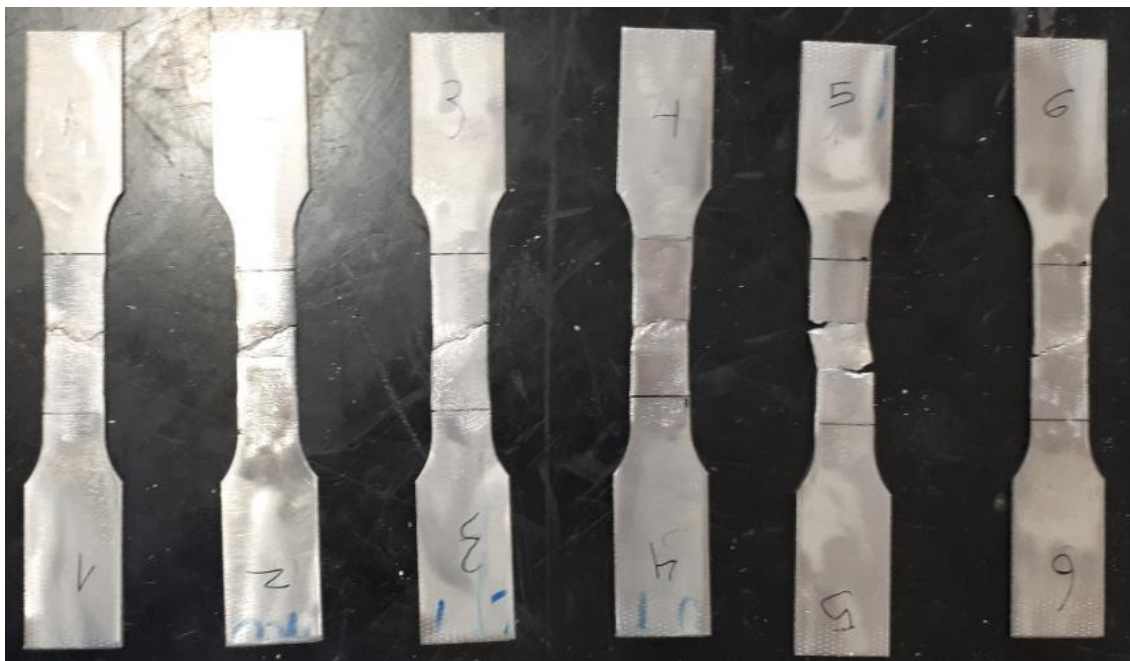
Soldadura óptima + 3 reparaciones completas (espesor = 2 mm)



Soldadura óptima + 4 reparaciones completas (espesor = 2 mm)



Soldadura óptima + 5 reparaciones completas (espesor = 2 mm)



Soldadura óptima + 1 reparación parcial (espesor = 1 mm)



Soldadura óptima + 2 reparaciones parciales (espesor = 1 mm)



Soldadura óptima + 3 reparaciones parciales (espesor = 1 mm)



Soldadura óptima + 4 reparaciones parciales (espesor = 1 mm)



Soldadura óptima + 5 reparaciones parciales (espesor = 1 mm)



Soldadura óptima + 1 reparación parcial (espesor = 2 mm)



Soldadura óptima + 2 reparaciones parciales (espesor = 2 mm)



Soldadura óptima + 3 reparaciones parciales (espesor = 2 mm)



Soldadura óptima + 4 reparaciones parciales (espesor = 2 mm)



Soldadura óptima + 5 reparaciones parciales (espesor = 2 mm)



ANEXO II: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN

Soldadura óptima (espesor = 1 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
1_CO_1	802,22	882,22	3,3	Cordón de soldadura
1_CO_2	740,35	805,56	4,86	Cordón de soldadura
1_CO_3	825,62	931,44	3,52	Cordón de soldadura
1_CO_4	897,65	974,45	4,14	Cordón de soldadura
1_CO_5	776,67	864,62	3,22	Cordón de soldadura
1_CO_6	870,15	943,62	4,77	Cordón de soldadura
Media	818,89	900,31	3,97	-
Desviación estándar	53,39	56,15	0,66	-

Soldadura óptima + 1 reparación completa (espesor = 1 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
1_C1_1	450,9	748,77	3,2	Cordón de soldadura
1_C1_2	605,35	630,35	3,16	Cordón de soldadura
1_C1_3	829,85	991,61	4,2	Cordón de soldadura
1_C1_4	855,1	942,35	3,4	Cordón de soldadura
1_C1_5	787,09	900,33	3,94	Cordón de soldadura
1_C1_6	674,75	848,03	4,44	Cordón de soldadura
Media	700,51	843,57	3,72	-
Desviación estándar	155,01	133,69	0,54	-

Soldadura óptima + 2 reparaciones completas (espesor = 1 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
1_C2_1	485,03	530,43	3	Cordón de soldadura
1_C2_2	867,85	892,19	4,2	Cordón de soldadura
1_C2_3	470,23	826,32	3	Cordón de soldadura
1_C2_4	565,71	784,62	3,66	Cordón de soldadura
1_C2_5	468,75	840,13	3,36	Cordón de soldadura
1_C2_6	470,39	756,17	2,92	Cordón de soldadura
Media	554,66	771,64	3,36	-
Desviación estándar	157,9	127,12	0,5	-

Soldadura óptima + 3 reparaciones completas (espesor = 1 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
1_C3_1	639,64	807,81	4,76	Cordón de soldadura
1_C3_2	630,51	640,71	3,2	Cordón de soldadura
1_C3_3	637,01	910,44	3,36	Cordón de soldadura
1_C3_4	330,76	388,16	2,4	Cordón de soldadura
1_C3_5	687,25	914,64	3,1	Cordón de soldadura
1_C3_6	508,8	756,09	3,6	Cordón de soldadura
Media	572,33	736,31	3,4	-
Desviación estándar	132,44	198,98	1,23	-

Soldadura óptima + 4 reparaciones completas (espesor = 1 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
1_C4_1	468,67	537,91	3,08	Cordón de soldadura
1_C4_2	424,26	463,16	3,16	Cordón de soldadura
1_C4_3	326,15	329,03	2,8	Cordón de soldadura
1_C4_4	526,89	765,05	3,7	Cordón de soldadura
1_C4_5	305,43	337,99	2,9	Cordón de soldadura
Media	410,28	486,63	3,13	-
Desviación estándar	93,91	178,63	1,08	-

Soldadura óptima + 5 reparaciones completas (espesor = 1 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
1_C5_1	462,25	619,24	3,2	Cordón de soldadura
1_C5_2	222,7	504,36	3,26	Cordón de soldadura
1_C5_3	402,47	492,52	3	Cordón de soldadura
1_C5_4	419,08	586,27	4	Cordón de soldadura
1_C5_5	370,31	641,78	4,2	Cordón de soldadura
Media	375,36	568,83	3,53	-
Desviación estándar	91,55	67,35	0,53	-

Soldadura óptima (espesor = 2 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
2_CO_1	810,77	1030,76	6,26	Metal base
2_CO_2	856,74	1013,82	4,74	Metal base
2_C1_3	932,77	1005,43	5,48	Metal base
2_C1_4	913,32	1010,57	5,16	Metal base
2_C1_5	946,22	1016,45	5,4	Metal base
2_C1_6	833,72	1000,41	4,82	Metal base
Media	882,26	1012,91	5,31	-
Desviación estándar	56,08	10,48	0,55	-

Soldadura óptima + 1 reparación completa (espesor = 2 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
2_C1_1	825,49	1001,19	5,6	Metal base
2_C1_2	861,39	1014,31	5,5	Metal base
2_C1_3	NA	1003,82	4,4	Metal base
2_C1_4	780,76	993,3	4,2	Metal base
2_C1_5	835,16	1010,9	5,26	Metal base
2_C1_6	677,67	975,78	5,24	Metal base
Media	796,09	999,88	5,03	-
Desviación estándar	72,31	13,94	0,59	-

Soldadura óptima + 2 reparaciones completas (espesor = 2 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
2_C2_1	785,2	938,45	5,29	Cordón de soldadura
2_C2_2	803,99	937,13	3,71	Cordón de soldadura
2_C2_3	NA	919,24	4,33	Cordón de soldadura
2_C2_4	836,72	957,36	4,63	Cordón de soldadura
2_C2_5	707,36	771,38	4,23	Cordón de soldadura
2_C2_6	763,69	862,09	4,63	Cordón de soldadura
Media	729,47	897,61	4,47	-
Desviación estándar	129,72	69,95	1,06	-

Soldadura óptima + 3 reparaciones completas (espesor = 2 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
2_C3_1	748,64	935,65	4	Cordón de soldadura
2_C3_2	657,69	907,03	4,64	Cordón de soldadura
2_C3_3	660,73	872,86	4,2	Cordón de soldadura
2_C3_4	641,12	883,31	4,2	Cordón de soldadura
2_C3_5	663,32	864,51	5,5	Cordón de soldadura
2_C3_6	636,02	878,7	4,3	Cordón de soldadura
Media	667,92	890,34	4,47	-
Desviación estándar	41,06	26,42	0,55	-

Soldadura óptima + 4 reparaciones completas (espesor = 2 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
2_C4_1	625,45	843,62	4,25	Cordón de soldadura
2_C4_2	661,81	814,98	3,86	Cordón de soldadura
2_C4_3	742,19	879,45	2,89	Cordón de soldadura
2_C4_4	610,28	853,9	4,05	Cordón de soldadura
2_C4_5	712,23	781,48	3,45	Cordón de soldadura
2_C4_6	724,89	852,29	4,55	Cordón de soldadura
Media	679,47	837,62	3,84	-
Desviación estándar	50,14	31,43	0,54	-

Soldadura óptima + 5 reparaciones completas (espesor = 2 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
2_C5_1	608,06	710,49	2,20	Cordón de soldadura
2_C5_2	668,26	807,81	3,56	Cordón de soldadura
2_C5_3	705,8	845,39	3,84	Cordón de soldadura
2_C5_4	717,48	803,5	3,30	Cordón de soldadura
2_C5_5	756,33	877,8	7,00	Cordón de soldadura
2_C5_6	691,41	790,34	2,90	Cordón de soldadura
Media	691,22	805,89	3,8	-
Desviación estándar	50,17	56,72	1,67	-

Soldadura óptima + 1 reparación parcial (espesor = 1 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
1_P1_1	738,09	924,52	2,68	Cordón de soldadura
1_P1_2	673,5	858,65	2,8	Cordón de soldadura
Media	705,79	891,59	2,74	-
Desviación típica	43,22	46,58	0,08	-

Soldadura óptima + 2 reparaciones parciales (espesor = 1 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
1_P2_1	553,7	906,33	3,2	Cordón de soldadura
1_P2_2	516,61	854,03	2	Cordón de soldadura
Media	535,16	880,18	2,6	-
Desviación estándar	26,23	36,98	0,85	-

Soldadura óptima + 3 reparaciones parciales (espesor = 1 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
1_P3_1	539,23	562,58	2,3	Cordón de soldadura
1_P3_2	504,77	562,99	2,58	Cordón de soldadura
Media	522	562,79	2,44	-
Desviación estándar	24,37	0,29	0,1	-

Soldadura óptima + 4 reparaciones parciales (espesor = 1 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
1_P4_2	398,03	483,47	2,3	Cordón de soldadura
Media	398,03	483,47	2,3	-
Desviación estándar	-	-	-	-

Soldadura óptima + 5 reparaciones parciales (espesor = 1 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
1_P5_1	395,48	546,3	1,94	Cordón de soldadura
1_P5_2	450,41	543,34	1,82	Cordón de soldadura
Media	422,95	544,82	1,88	-
Desviación estándar	38,84	2,09	0,08	-

Soldadura óptima + 1 reparación parcial (espesor = 2 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
2_P1_1	804,33	960,00	4,80	Cordón de soldadura
2_P1_2	867,12	954,53	5,4	Cordón de soldadura
Media	835,73	957,27	5,1	-
Desviación estándar	44,4	44,4	0,07	-

Soldadura óptima + 2 reparaciones parciales (espesor = 2 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
2_P2_1	827,22	946,22	4,35	Cordón de soldadura
2_P2_2	896,13	951,48	5	Cordón de soldadura
Media	861,68	948,85	4,68	-
Desviación estándar	48,73	3,72	0,42	-

Soldadura óptima + 3 reparaciones parciales (espesor = 2 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
2_P3_1	837,46	874,96	3,30	Cordón de soldadura
2_P3_2	856,41	878,82	3,90	Cordón de soldadura
Media	846,94	876,89	3,6	-
Desviación estándar	13,4	2,73	0,42	-

Soldadura óptima + 4 reparaciones parciales (espesor = 2 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
2_P4_1	732,94	864,88	3,35	Cordón de soldadura
2_P4_2	722,53	855,43	2,71	Cordón de soldadura
Media	727,74	860,16	3,03	-
Desviación estándar	7,36	6,68	0,45	-

Soldadura óptima + 5 reparaciones parciales (espesor = 2 mm)

Probetas	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Zona de rotura
2_P5_1	682,29	831,13	2	Cordón de soldadura
2_P5_2	751,04	867,2	4,1	Cordón de soldadura
Media	716,67	849,17	3,05	-
Desviación estándar	48,61	25,51	1,48	-

ANEXO III: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DUREZA

Soldadura completa (espesor = 1 mm)

PROBETAS		DISTANCIA DE LAS MEDICIONES AL CENTRO DEL CORDÓN (MM)						
		6	8,5	11	13,5	16	18,5	MB
Soldadura óptima	Probeta 1	106,7	107,3	106,9	107,5	107,6	107,7	107,6
	Probeta 2	107,6	107,1	107,6	107,9	107,8	107,8	108
1 reparación	Probeta 1	107,7	104,6	107	106,5	106,2	107,9	107,8
	Probeta 2	107,3	106,7	107,1	108	108,1	107,1	107,9
2 reparaciones	Probeta 1	106,9	105,2	107,6	104,3	106,1	107,9	107,8
	Probeta 2	107,2	107,8	107,8	107,8	107,8	108	107,8
3 reparaciones	Probeta 1	107,2	107,6	107,4	107,5	108,1	107,4	107,7
	Probeta 2	106,8	106,2	106	108	107,8	107,5	107,5
4 reparaciones	Probeta 1	107,3	104,5	104,8	107,6	107,3	107,3	107,9
	Probeta 2	84,3	105,3	107,7	107,4	107,7	107,6	107,3
5 reparaciones	Probeta 1	106,5	106	107,4	107,7	107,7	107,7	107,7
	Probeta 2	106	105,6	107,6	107,6	107,7	107,7	107,9

Soldadura completa (espesor = 2 mm)

PROBETAS		DISTANCIA DE LAS MEDICIONES AL CENTRO DEL CORDÓN (MM)						
		6	8,5	11	13,5	16	18,5	MB
Soldadura óptima	Probeta 1	108,7	109,3	108,9	108,5	108,6	107,7	108,7
	Probeta 2	109,6	109,1	109,6	108,9	108,2	107,8	109,6
1 reparación	Probeta 1	107,8	109,6	108,4	108,3	108,2	107,8	107,8
	Probeta 2	109,6	109,3	108,9	108,1	108,4	107,9	109,6
2 reparaciones	Probeta 1	108,9	107,9	108,2	108,1	108,2	107,7	108,9
	Probeta 2	109,1	108,4	107,7	108	107,8	108	109,1
3 reparaciones	Probeta 1	107,9	108,6	108,1	108	108,5	107,7	107,9
	Probeta 2	109	108,4	108,2	108,3	107,9	107,6	109
4 reparaciones	Probeta 1	109,8	107,6	108,9	108	108,4	107,7	109,8
	Probeta 2	109,1	108,4	107,7	107,7	108,6	107,4	109,1
5 reparaciones	Probeta 1	108,5	109	107,5	107,9	108,3	107,5	108,5
	Probeta 2	107,7	108	108,3	108,4	108	107,8	107,7

Soldadura parcial (espesor = 1 mm)

PROBETAS		DISTANCIA DE LAS MEDICIONES AL CENTRO DEL CORDÓN (MM)						
		6	8,5	11	13,5	16	21	MB
1 reparación	Probeta 1	107,5	108,4	106,7	107,2	108,2	108	107,5
	Probeta 2	107,7	107,5	106,4	107,6	107,8	108,3	107,6
2 reparaciones	Probeta 1	107,7	107,3	107,6	107,9	108	107,8	108,2
	Probeta 2	107,3	107,3	107,7	108	107,8	107,7	107,4
3 reparaciones	Probeta 1	107,5	106,5	107,9	107,9	107,9	107,1	107,9
	Probeta 2	107,2	104,8	107,4	108,2	108,4	107,9	107,3
4 reparaciones	Probeta 1	106,8	107,9	107,9	107,7	107,8	107,9	107,6
	Probeta 2	106,6	108	108,6	107,9	108,5	107,7	107,4
5 reparaciones	Probeta 1	108,4	106,9	107,8	108,3	107	107	107,7
	Probeta 2	107,5	108	106,1	108,7	108,5	108,7	107,9

Soldadura parcial (espesor = 2 mm)

PROBETAS		DISTANCIA DE LAS MEDICIONES AL CENTRO DEL CORDÓN (MM)						
		6	8,5	11	13,5	16	18,5	MB
1 reparación	Probeta 1	108,8	108,2	108,9	107,6	108,3	107,4	107,9
	Probeta 2	108,6	108,5	108,1	108,2	108	107,7	107,6
2 reparaciones	Probeta 1	109,2	108,5	108,5	108,5	107,9	107,6	107,2
	Probeta 2	108,9	108,7	108,3	108,7	108,4	107,8	107
3 reparaciones	Probeta 1	109,1	107,6	108,9	108,7	108,2	106,9	107,3
	Probeta 2	107,8	107,5	108,3	106,7	107,8	107,8	107,5
4 reparaciones	Probeta 1	108,9	108,1	107,9	107,5	107,9	107,6	107,4
	Probeta 2	108,1	108,8	107,9	107,7	108,4	107,8	107,8
5 reparaciones	Probeta 1	108,5	108,1	107,1	107,9	108,4	106,3	107,5
	Probeta 2	110,1	108,6	107,7	108,3	108,6	106,9	107,1