

Proyecto Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

Estudio de la relación de los parámetros de soldadura con la defectología ocasionada y las propiedades mecánicas de los materiales.

Autor: Marco Isidoro Palomo

Tutor: Carpóforo Vallellano Martín

Rodrigo De Haro García

Miguel Ángel Esteban

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

Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

Estudio de la relación de los parámetros de soldadura con la defectología ocasionada y las propiedades mecánicas de los materiales.

Autor:

Marco Isidoro Palomo

Tutor:

Carpoforo 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

Dep. de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Proyecto Fin de Carrera: Estudio de la relación de los parámetros de soldadura con la defectología ocasionada y las propiedades mecánicas de los materiales.

Autor: Marco Isidoro Palomo

Tutor: Carpofofo 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, 2018

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer el incondicional apoyo recibido por mi familia durante toda la duración del proyecto.

Por otro lado, agradecer a la dirección de AIRGRUP S.L por permitirme hacer este estudio en sus instalaciones, poniendo todo el personal necesario a nuestra disposición para cada una de las distintas acciones que hemos llevado a cabo durante el proyecto. Agradecer a mis tutores Miguel Ángel Esteban y Rodrigo de Haro en Airgrup, por darme la oportunidad y confianza para hacer este proyecto.

Por parte de la Universidad, agradecer toda la ayuda de mi tutor académico profesor Carpóforo Vallellano, así como al profesor José María Gallardo Fuentes por sus comentarios e indicaciones durante la realización del estudio.

Me gustaría hacer especial mención a la labor desempeñada por el Soldador Sergio Orozco el cual ha sido el encargado de realizar la soldadura de todos los cupones tratados. Por su intachable profesionalidad y en lo personal su amabilidad y disponibilidad ante cualquiera de los problemas que han ido surgiendo a lo largo del proyecto.

En definitiva, gracias a todos, porque todos habéis puesto vuestro granito de arena para que este trabajo saliera adelante.

Marco Isidoro Palomo

Sevilla, 2018

Resumen

La tecnología de soldeo por TIG (tungsten inert gas) es una de las más usadas para el soldeo en la industria aeronáutica. Se basa en un soldeo por arco bajo gas protector con electrodo no consumible.

En este estudio se analizan uniones soldadas en configuración tope-tope entre chapas de aluminio 6061T4 de 1 y 3,2 mm de espesor. Se simulan reparaciones, así como se someten estas uniones a tratamientos térmicos tanto antes como después de la operación de soldeo, teniendo un total de 24 casuísticas diferentes para las chapas de 1 mm de espesor y 7 para las chapas de 3,2 mm de espesor.

Puesto que el aluminio es el material que presenta más defectologías en comparación con el acero y el titanio durante el soldeo se realiza un análisis de las propiedades mecánicas de la soldadura y un análisis metalúrgico de la esta.

A partir de los resultados obtenidos de los ensayos de tracción y dureza vemos como se degradan las propiedades de la unión a medida que se aplican más reparaciones. La rotura, de forma general, se tiene a unos 8-9 mm desde el centro del cordón (zona de menor dureza dentro de la zona afectada térmicamente) para chapas de 1 mm. Aunque, se observa que en algunos casos se producen fallos extremadamente frágiles sobretodo cuando se realizan tratamientos térmicos de endurecimiento posterior a la operación de soldeo en la zona de unión entre el metal base y el metal de soldadura.

En cuanto a los análisis metalúrgicos, son realizadas metalografías de las 3 zonas que podemos encontrar en la soldadura (metal base, zona afectada térmicamente y metal de soldadura) con distintas magnificaciones lo que permitirá ver la estructura interna del material, y se realiza un análisis de tamaño de grano en la zona de contacto entre metal base y metal de soldadura, zona por donde se produce la fractura extremadamente frágil ya mencionada. Se observa un crecimiento de grano con el aumento de las reparaciones lo cual podría ser uno de los motivos de este tipo de rotura aunque no se descartan otros motivos como el agrietamiento en caliente o la formación de eutéctico en la zona de rotura.

Al final del documento se establecen conclusiones a partir de los resultados procesados como, por ejemplo, cuáles son las configuraciones más óptimas para el tipo de soldeo estudiado en cuanto a tratamientos térmicos y cuáles son los principales efectos que tiene sobre la unión el uso de estos tratamientos térmicos junto con el número de reparaciones simuladas. Por último, se proponen futuras vías de desarrollo en relación con el tema tratado.

Abstract

The technology of welding by TIG (tungsten inert gas) is one of the most used for welding in the aeronautical industry. It is based on arc welding under protective gas with non-consumable electrode.

In this study, butt joints welded between 6061T4 aluminum plates of 1 and 3.2 mm thickness are analyzed. Repairs are simulated, as well as these joints are subjected to thermal treatments both before and after the welding, having a total of 24 different casuistics for the sheets of 1 mm in thickness and 7 for the sheets of 3.2 mm in thickness.

Since aluminum is the material which presents more defects compared to steel and titanium during welding, an analysis is made of the mechanical properties of the weld and metallurgical aspects of this.

From the results obtained from the tensile and hardness tests we see how the properties of the joint are degraded as more repairs are applied. The break is generally about 8-9 mm from the center of the weld bead (area of least hardness inside the heat affected zone) for 1 mm sheets. although it can be observed that in some cases extremely fragile failures occur especially when perform heat treatments of hardening after the welding operation in the area of union between base and weld metal.

As for the metallurgical analyzes, metallographies are made of the 3 zones that can be found in the weld (base metal, heat affected zone and welding metal) with different magnifications which will allow us to see the internal structure of the material, and also an analysis is made of grain size in the contact zone between base metal and weld metal, zone where the extremely fragile fracture already mentioned occurs. A grain growth is observed with the increase in reparations, which could be one of the reasons for this type of break, although other reasons such as hot cracking or the formation of eutectic in the breaking area are not ruled out.

At the end of the document, conclusions are drawn from the processing results such as, for example, which are the most optimal configurations for the type of welding studied in terms of thermal treatments and what are the main effects on the joint the use of these treatments thermal along with the number of simulated repairs. Lastly, future development paths are proposed in relation to the subject treated.

Agradecimientos	viii
Resumen	x
Abstract	xii
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvi
Notación	xviii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. <i>Introducción histórica</i>	1
1.2. <i>Soldeo Basado en Arco eléctrico.</i>	2
1.2.1. Soldeo TIG.	3
1.3. <i>Propiedades y defectologías asociadas al soldeo de materiales aeronáuticos.</i>	5
1.3.1. Aceros	5
1.3.2. Titanio	6
1.3.3. Aluminio y sus aleaciones	6
1.3.4. Defectologías.	7
1.4. <i>Ensayos para la caracterización mecánica de la soldadura.</i>	9
1.5. <i>Clases de soldadura. (I+D-P-181)</i>	9
2 OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN DEL TRABAJO	11
2.1. <i>Objetivos</i>	11
2.2. <i>Motivación del trabajo.</i>	11
3 CASOS DE ESTUDIOS PROPUESTOS	13
3.1 <i>Parámetros comunes de soldeo.</i>	13
3.1.1 Tipo de corriente.	13
3.1.2 Gas de protección.	14
3.1.3 Configuración unión.	14
3.1.4 Material base de la soldadura.	14
3.1.5 Material de aporte.	15
3.1.6 Electrodo.	16
3.2. <i>Configuraciones no comunes.</i>	16
3.2.1. Número de reparaciones.	16
3.2.2. Tratamientos térmicos.	17
3.3. <i>Casos de estudio.</i>	18
4 ANÁLISIS COMPARATIVO Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	21
4.1. <i>Resultados y discusión de los ensayos destructivos.</i>	21
4.1.1 Resultados de los ensayos de tracción.	21
4.1.2 Resultados de los ensayos de dureza.	27
4.2. <i>Metalografías.</i>	37
4.2.1. Estudio del tamaño de grano.	38

5	CONCLUSIONES Y POSIBLE CONTINUACIÓN DEL ESTUDIO	41
5.1.	<i>Conclusiones.</i>	41
5.2.	<i>Posible continuación del estudio</i>	42
6	Referencias	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características del soldeo según la corriente seleccionada. [3]	5
Tabla 2. Principales aleantes utilizados en las aleaciones de aluminio. [3]	6
Tabla 3. Parámetros en corriente alterna para la realización de la soldadura.	14
Tabla 4. Parámetros de soldeo relativos al gas de protección (Argón).	14
Tabla 5. Composición química del material de aporte 4043.	15
Tabla 6. Resultados del ensayo de tracción con 0 reparaciones y espesor de chapa de 1 mm.	22
Tabla 7. Resultados del ensayo de tracción con 1 reparación y espesor de chapa de 1 mm.	22
Tabla 8. Resultados del ensayo de tracción con 2 reparaciones y espesor de chapa de 1 mm.	23
Tabla 9. Resultados del ensayo de tracción con 3 reparaciones y espesor de chapa de 1 mm.	23
Tabla 10. Resultados del ensayo de tracción con 0 y 3 reparaciones y espesor de chapa de 3,2 mm.	24
Tabla 11. Distancias de rotura en mm registradas para cada una de las probetas con 0 reparaciones y espesor de chapa de 1 mm.	28
Tabla 12. Distancias de rotura en mm registradas para cada una de las probetas con 1 reparación y espesor de chapa de 1 mm.	29
Tabla 13. Distancias de rotura en mm registradas para cada una de las probetas con 2 reparaciones y espesor de chapa de 1 mm.	29
Tabla 14. Distancias de rotura en mm registradas para cada una de las probetas con 3 reparaciones y espesor de chapa de 1 mm.	29
Tabla 15. Distancias de rotura en mm registradas para cada una de las probetas con 0 reparaciones y espesor de chapa de 3,2 mm.	29
Tabla 16. Distancias de rotura en mm registradas para cada una de las probetas con 3 reparaciones y espesor de chapa de 3,2 mm.	30
Tabla 17. Resultados del método de Abrams para el cálculo de G.	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Partes en las que se divide el arco eléctrico. [3]	3
Figura 2. Proceso de soldeo TIG.[3]	3
Figura 3. Técnica a seguir para iniciar y efectuar el soldeo. (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.	4
Figura 4. Definición de las diferentes zonas en una soldadura de aluminio. [1]	7
Figura 5. Falta de penetración en la raíz.	8
Figura 6. Mordedura.	8
Figura 7. Falta de fusión en los bordes.	8
Figura 8. Porosidad.	9
Figura 9. Disposición de elementos auxiliar para facilitar el soldeo junto con los cupones en configuración a tope.	15
Figura 10. Herramientas utilizadas para el proceso de conformado durante las operaciones de reparación. Cepillo de alambre (izquierda), fresa (derecha).	16
Figura 11. Cargas de rotura en Megapascales frente al número de reparaciones y para las diferentes combinaciones de tratamientos térmicos.	25
Figura 12. Cargas de rotura representadas en % respecto al valor tomado de la “soldadura óptima” para las distintas casuísticas propuestas para chapas de espesor igual a 1 mm.	26
Figura 13. Cargas de rotura representadas en % respecto al valor tomado de la “soldadura óptima” para las distintas casuísticas propuestas para chapas de espesor igual a 3,2 mm.	27
Figura 14. Línea de dureza esquematizada para las series de aluminio 5xxx (a), 6xxx (b) y 7xxx (c). [1]	28
Figura 15. Línea de dureza para el caso sin tratamientos térmicos adicionales con la variación del número de reparaciones simuladas.	30
Figura 16. Línea de dureza para el caso con posterior alivio de tensiones con la variación del número de reparaciones simuladas.	31
Figura 17. Línea de dureza para el caso con posterior maduración con la variación del número de reparaciones simuladas.	32
Figura 18. Línea de dureza para el caso con anterior maduración con la variación del número de reparaciones simuladas.	33
Figura 19. Línea de dureza para el caso con posterior solubilización más maduración con la variación del número de reparaciones simuladas.	34
Figura 20. Línea de dureza para el caso con posterior solubilización más maduración con la variación del número de reparaciones simuladas.	35
Figura 21. Línea de dureza para casos aceptados con 0 reparaciones.	36
Figura 22. Línea de dureza para casos aceptados con 1 reparación.	36
Figura 24. Diagrama de fase Aluminio-Silicio.	38
Figura 25. ASTM Grain size number para los casos propuestos en función del número de reparaciones.	40

Notación

Z.A.T.	Zona afectada térmicamente
T.T	Tratamientos térmicos
WM	Weld metal
UMZ	Unmixed zone
HAZ	Heat affected zone
PMZ	Partially melted zone
G	ASTM grain size number
mm	Milímetros
TIG	Tungsten Inert Gas
CCEP	Corriente Continua Polaridad Inversa

1 INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción histórica

El soldeo es una tecnología en constante desarrollo, nuevas técnicas se desarrollan día a día para cumplir las necesidades que las nuevas situaciones industriales plantean y para resolver los problemas que se presentan durante los procesos de fabricación.

Existen evidencias de que el hombre soldó el hierro por forja desde los primeros tiempos de la Edad de Hierro y éste fue uno de los procedimientos que utilizaron los romanos para fabricar sus espadas. Varias piezas cilíndricas y alambres eran entrelazados juntos y después calentados y forjados, a veces se plegaban, de nuevo, sobre sí mismas y se repetía el proceso de forja en caliente.

En la alta Edad Media, los Vikingos también fabricaban sus espadas mediante soldeo por forja de bandas de hierro que previamente eran carburizadas. De esta forma obtenían una distribución más homogénea del carbono que por cementación. La relativa importancia adquirida por el soldeo como técnica de fabricación durante la Edad Media se debió al alto costo del acero y al hecho de que los lingotes de hierro obtenidos eran de tamaño relativamente pequeño.

El perfeccionamiento de las técnicas de fabricación provocó que decayera al final de la Edad Media la importancia relativa del soldeo en la elaboración de los metales. No volvió a recuperar el soldeo su importancia hasta que en las postrimerías del siglo XIX y principios del XX se hizo posible el soldeo por fusión, al disponerse industrialmente de fuentes caloríficas suficientemente intensas como para producir una fusión localizada de los bordes a unir. De esta forma nace el soldeo oxiacetilénico, por arco eléctrico y por resistencia.

El soldeo por llama se desarrolló cuando fue posible el abastecimiento a escala industrial de oxígeno, hidrógeno y acetileno a precios accesibles, se inventaron los sopletes adecuados y se desarrollaron las técnicas de almacenamiento de dichos gases. En el año 1916 el soldeo oxiacetilénico era ya un proceso completamente desarrollado, capaz de producir soldaduras por fusión de calidad en chapas finas de acero, aluminio y cobre desoxidado, existiendo sólo ligeras diferencias con los procesos utilizados en la actualidad.

El arco eléctrico fue descubierto por Sir Humphrey Davy en 1.801 y presentado en el Royal Institute de Inglaterra en 1.808. Probablemente el primer intento serio para usar el arco eléctrico como fuente calorífica para el soldeo lo realizó A. de Meritens para tratar de unir las placas de plomo de una batería. 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, a pesar de las pérdidas, fue suficiente para producir la unión de las placas.

En 1.889, N.G. Slavianoff en Rusia y C. Coffin en U.S.A. patentaron dos procesos de soldeo similares, en donde el electrodo de carbono se reemplazaba por una varilla metálica. El arco se establecía entre la pieza y la varilla, ésta se fundía gradualmente y el metal fundido se incorporaba a la unión. Coffin llegó a ser presidente de la General Electric Company.

No fue hasta 1.912 que Strohmenger patentó en U.S.A. un electrodo fuertemente recubierto, capaz de producir a escala industrial soldaduras con buenas propiedades mecánicas. En estos primeros tiempos, el soldeo por arco

se utilizó fundamentalmente en la reparación de piezas desgastadas o dañadas. No fue hasta la Primera Guerra Mundial que empezó a ser aceptada como técnica de unión en la construcción.

En la misma etapa, experimentó un gran desarrollo el soldeo por resistencia debido, en gran medida, a que no planteaba problemas metalúrgicos tan graves como el soldeo por arco. En 1.920 ya estaban plenamente establecidos el soldeo por puntos, utilizado para unir chapas finas solapadas, y el soldeo a tope, empleado en la fabricación de los eslabones de cadenas y para la unión de secciones de barras.

A partir de 1.930 las aplicaciones del soldeo por arco crecieron rápidamente. En este año se construye en Carolina del Sur un barco mercante totalmente soldado que fue el precursor de los miles de barcos soldados construidos durante la Segunda Guerra Mundial.

Durante la década de los treinta fue cuando se generalizó el uso del acero inoxidable. Estos materiales eran difíciles de soldar porque el hidrógeno procedente del recubrimiento producía porosidad. Hubieron de ser desarrollados, para tal fin, electrodos con recubrimientos de bajo contenido en hidrógeno. Al principio de los años cuarenta se descubrió que estos electrodos producían soldaduras de muy buena calidad y los recubrimientos de los electrodos de aceros inoxidables se incorporaron a los electrodos de aceros de baja aleación.

Las roturas espectaculares producidas en los barcos soldados durante la Segunda Guerra Mundial, especialmente en la serie Liberty, en donde sobre un total de cerca de 5.000 barcos construidos, 1.289 presentaron roturas importantes y muchos de ellos se rompieron completamente en dos mitades, condujeron a profundas investigaciones sobre la rotura frágil y, aunque el conocimiento de este problema aún no se ha completado, existe, en la actualidad, la suficiente información para su control efectivo.

Ni el soldeo con electrodo revestido ni por arco sumergido fueron procesos útiles para soldar metales muy reactivos como el aluminio y magnesio. La solución vino, al final de los años treinta, con el empleo de los gases inertes como medio de protección. El primer proceso con protección gaseosa empleó un electrodo no consumible de tungsteno y helio como gas de protección, recibió la denominación de TIG (Tungsten Inert Gas). Inicialmente se utilizó corriente continua con el electrodo conectado al polo positivo. No obstante, este sistema producía un sobrecalentamiento del electrodo y transferencia de partículas de tungsteno al cordón. El cambio de polaridad solventó el problema y permitió sin dificultad el soldeo de materiales como los aceros inoxidables. El proceso todavía se mejoró cuando se introdujo el uso de corriente alterna, a la que se superpone una corriente de alta frecuencia y voltaje para mejorar la estabilidad del arco.

A partir de los años sesenta los procesos alcanzaron un alto nivel de desarrollo y las investigaciones se dirigieron hacia mayores automatizaciones, robotizaciones y al control de la calidad por medio de los ensayos no destructivos, particularmente ultrasonidos, radiografías, líquidos penetrantes y partículas magnéticas.

En los últimos años se han desarrollado procesos de soldeo de alta energía, como son el soldeo por "haz de electrones" y "láser". Aunque estos procesos son capaces de producir soldaduras que antes no eran posibles, sus aplicaciones quedan limitadas a campos específicos y son tecnologías en continuo desarrollo.

En la actualidad, los desarrollos tecnológicos se centran en la aplicación de la microelectrónica y de la informática, para un mejor control del arco y de los parámetros de soldeo. Más que la aparición de nuevos procesos se está consiguiendo la ampliación del campo de aplicación de los ya existentes a nuevos materiales no metálicos y a aleaciones metálicas hasta ahora difícilmente soldables, sin olvidar la mecanización, automatización, robotización y control de los procesos mediante ensayos no destructivos y registro de los parámetros en tiempo real.

1.2. Soldeo Basado en Arco eléctrico.

En este apartado se presenta las bases del soldeo basado en arco eléctrico.

El arco eléctrico se podría definir como una descarga de corriente en un medio gaseoso. A efectos prácticos, el arco en soldadura se puede considerar como un conductor gaseoso en el cual se transforma la energía eléctrica en calor.

En el soldeo por arco eléctrico, incrementar la longitud de arco implica soldar con una mayor tensión y viceversa, incrementar la tensión implica que la longitud de arco se incrementa.

Las propiedades del arco eléctrico se podrían resumir en la siguiente lista:

- Proporciona alta intensidad de calor.
- Fácil de controlar.
- Elimina óxidos superficiales.
- Condiciona el tipo de transferencia del metal.
- Precisa la existencia de un medio conductor gaseoso o plasma.

En soldadura, se podrán distinguir dos tipos de arcos eléctricos: arcos sin transferencia de masa y arcos con transferencia de masa.

El arco puede dividirse en tres partes distintas, el cátodo (electrodo negativo), el plasma y el ánodo (electrodo positivo), se puede ver en la Figura 1.

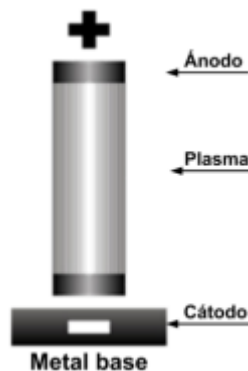


Figura 1. Partes en las que se divide el arco eléctrico. [3]

1.2.1. Soldeo TIG.

El procedimiento de soldeo por arco bajo gas protector con electrodo no consumible, también llamado TIG (Tungsten Inert Gas) utiliza como fuente de energía el arco eléctrico que se establece entre un electrodo no consumible y la pieza a soldar, mientras un gas inerte protege al baño de fusión. El material de aportación, cuando se utiliza, se aplica por medio de varillas como el soldeo oxiacetilénico.

En la Figura 2 se muestra la descripción del proceso de soldeo TIG.

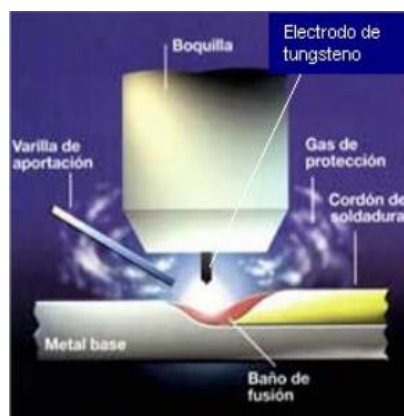


Figura 2. Proceso de soldeo TIG.[3]

El proceso TIG se puede utilizar para el soldeo de todos los materiales, incluidos el aluminio y el magnesio y los materiales sensibles a la oxidación como el titanio, circonio y sus aleaciones.

Puesto que el proceso posee las virtudes necesarias para conseguir soldaduras de alta calidad y con una elevada pureza metalúrgica, exentas de defectos y buen acabado superficial, es ideal para soldaduras de responsabilidad en la industria aeroespacial.

PRINCIPALES PARÁMETROS DE SOLDEO.

En el proceso de soldadura TIG existen diferentes parámetros a establecer que determinarán las características finales del cordón de soldadura.

- Diámetro del electrodo. El diámetro determina la intensidad de soldeo.
- Tipo de corriente. El proceso TIG puede utilizarse tanto en corriente continua como en corriente alterna. En función del material a soldar se elegirá la clase de corriente y polaridad. En la Tabla 1 se muestra las características del soldeo de acuerdo con la corriente seleccionada.
- Intensidad de soldeo.
- Velocidad de soldeo.

TÉCNICAS OPERATIVAS

Para llevar a cabo la soldadura TIG será necesario seguir una serie de pasos operativos listados a continuación:

1. Preparación de la unión. Se verificará las dimensiones de la unión y se contrastarán con las tolerancias para la misma y se realizará una limpieza.
2. Cebado del arco.
3. Técnica de soldeo manual. En la Figura 3, se indica la técnica que se debe seguir para iniciar y efectuar el soldeo.

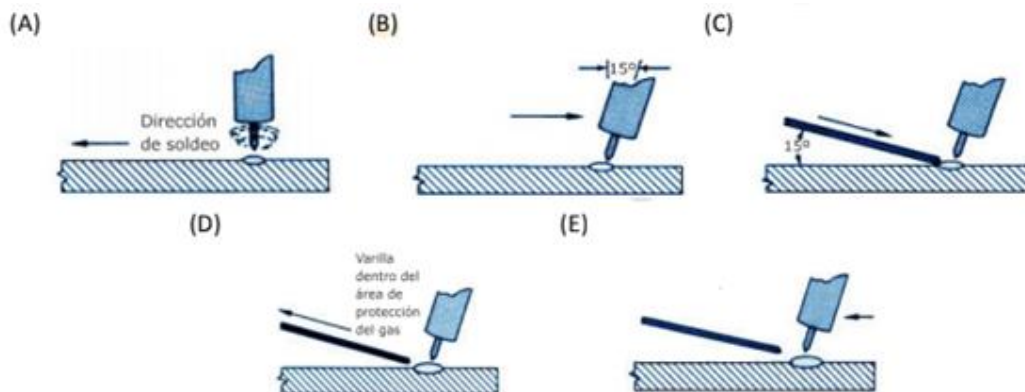
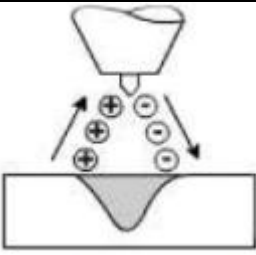
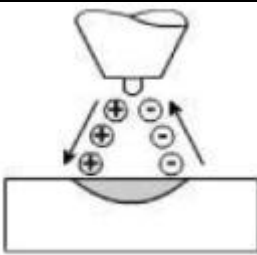
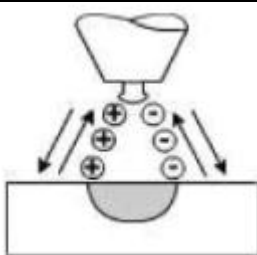





Figura 3. Técnica a seguir para iniciar y efectuar el soldeo. (A) Formación del baño de fusión, mediante un movimiento circular o de lado a lado, (B) desplazamiento del electrodo hacia el borde del baño de fusión, (C) adición de metal de aportación en el borde del baño de fusión, (D) movimiento continuo de la varilla a medida que se funde, (E) movimiento del electrodo siguiendo el borde del baño de fusión.

Tabla 1. Características del soldeo según la corriente seleccionada. [3]

Tipo de Corriente	Corriente continua	Corriente continua	Corriente Alterna
Polaridad	Directa	Inversa	
Flujo de electrones e iones			
Aspecto de la penetración			
Acción decapante	No	Sí	Sí. Una vez durante el semiciclo positivo
Balance calórico (aprox.)	70% en la pieza, 30% en la punta del electrodo	30% en la pieza, 70 % en la punta del electrodo	50% en la pieza, 50% en la punta del electrodo
Penetración	Profunda y estrecha	Ancha y menos profunda	Media
Comportamiento del electrodo	Excelente	Pobre	Buena

1.3. Propiedades y defectologías asociadas al soldeo de materiales aeronáuticos.

Hoy en día, en el área de soldadura aplicada al sector aeronáutico se emplean principalmente tres materiales: aceros, Titanio y sus aleaciones y aluminios aleados.

Cada uno de estos materiales presenta un comportamiento diferente cuando se utilizan para el proceso de soldeo. Esta diferencia en su comportamiento dará lugar a diferentes técnicas y parámetros usados para el procedimiento de soldeo TIG de cada uno.

Aunque el material utilizado para la realización del estudio es la aleación de Aluminio 6061T4, se realiza una breve comparación entre los materiales anteriormente mencionados.

1.3.1. Aceros

Entre los aceros más utilizados en Airgrup están el F-321 y el 15-5 PH.

1.3.1.1. Acero F-321

Este acero pertenece a la familia de aceros inoxidable Clase III, Grupo Austenítico.

A este acero inoxidable en concreto se le añade Ti para mejorar la soldabilidad.

La popularidad de los aceros de este grupo se debe a su excelente formabilidad y superior resistencia a la corrosión. Sus características son las siguientes:

- Excelente resistencia a la corrosión.
- Excelente soldabilidad.
- Excelente factor de higiene y limpieza.
- Funcionales a temperaturas extremas y temperaturas criogénicas.

1.3.1.2. Acero 15-5 PH

Este acero pertenece a la familia de aceros inoxidable Clase V, Aleaciones endurecibles por precipitación.

Estos son martensíticos en estado recocido y contienen niobio y cobre. Desarrollan su alta resistencia mecánica y dureza a través de tratamiento térmico que precipita el cobre.

Características básicas del grupo:

- Moderada a buena resistencia a la corrosión.
- Muy alta resistencia. Pueden lograrse hasta aproximadamente 1800 Mpa (excediendo la resistencia de los aceros inoxidable martensíticos) con resistencia a corrosión similar a la del Tipo 304.
- Buena soldabilidad.
- Magnéticos.

1.3.2. Titanio

El Titanio presenta una gran afinidad química por el oxígeno con la consecuente formación de óxidos de alta estabilidad.

Asimismo, presenta un rango de solubilidad alto con respecto al oxígeno, nitrógeno o hidrógeno, reduciendo este último la tenacidad y resiliencia. La capa de óxido superficial formada se caracteriza por su alta resistencia a la corrosión frente al ataque de sales y soluciones ácidas.

Con objeto de incrementar las características del titanio puro, se utilizan diferentes elementos de aleación, que pueden ser estabilizadores de la fase α o de la fase β . Dependiendo de la composición de la aleación y del historial térmico, podemos obtener aleaciones de titanio con fase α , fase β o mixta $\alpha + \beta$.

Un punto importante a la hora de considerar la soldabilidad de una aleación de titanio es el valor de resistencia a la fisuración durante la soldadura relacionada con el grado de deformación impuesto durante la fabricación, la resiliencia y la carga de rotura de la aleación.

El titanio puede unirse por soldeo con éxito a otros metales como: zirconio, niobio, tántalo y hafnio, no así con metales estructurales con los que forma compuestos intermetálicos frágiles (Fe, Ni, Cu y Al).

Debido a la alta afinidad frente a la absorción de O, N, H, causantes todos ellos de fragilización, se hace necesario proteger todas aquellas zonas que, durante el soldeo o tratamientos previos o posteriores, superen la temperatura de 262° (temperatura superada durante el soldeo TIG).

1.3.3. Aluminio y sus aleaciones

El aluminio es un metal con una baja resistencia mecánica. Por tanto, uno de los objetivos a la hora de diseñar aleaciones es mejorar su resistencia mecánicas aleándolo con diferentes metales como el cobre, magnesio, manganeso, zinc, hierro o silicio. En la Tabla 2 se representan los principales aleantes utilizados en la industria, así como un resumen de las principales propiedades que adquiere la aleación.

Tabla 2. Principales aleantes utilizados en las aleaciones de aluminio. [3]

Zn	Resistencia y dureza aumentadas. Posibilidad de corrosión bajo tensión. Combinado con Mg produce una aleación tratable térmicamente.
Cu	Produce una aleación tratable térmicamente. Resistencia y dureza aumentadas.
Mn	Reduce la resistencia a la corrosión.
Si	Combinado con Mg produce una aleación tratable térmicamente. Buena resistencia a la corrosión.
Mg	Resistencia aumentada. Dureza aumentada. Buena resistencia a la corrosión. Soldabilidad aumentada.

Las aleaciones para forja, no bonificables, de las series 1000, 3000 y 5000 no se pueden endurecer por Tratamientos Térmicos, pero son fácilmente soldables. En cuanto a las bonificaciones, endurecibles por Tratamientos Térmicos, de las series 2000, 6000 y 7000, también pueden soldarse, pero exigen temperaturas de trabajo más altas y mayores velocidades de soldeo. Para evitar la fisuración en la soldadura de estas aleaciones, se recomienda el empleo de varillas más ricas en elementos de aleación que el metal base.

El aluminio utilizado para el estudio será la aleación **6061T4**.

Esta aleación pertenece a la serie 6000, que son aquellas cuyos aleantes principales son el magnesio y el silicio.

La aleación estudiada en concreto recibe un tratamiento T4 que indica que pasa por un tratamiento de solución, temple, acritud y maduración natural hasta la obtención de un estado prácticamente estable. La designación se aplica a los productos que no sufren acritud después del tratamiento de solución y temple o para los cuales el efecto de la acritud asociada al aplanado o enderezado no repercute en los límites de las características mecánicas.

ZONAS EN LA SOLDADURA DEL ALUMINIO

En la Figura 4 se muestra un esquema de las diferentes zonas que se pueden encontrar a la hora de soldar aluminio.

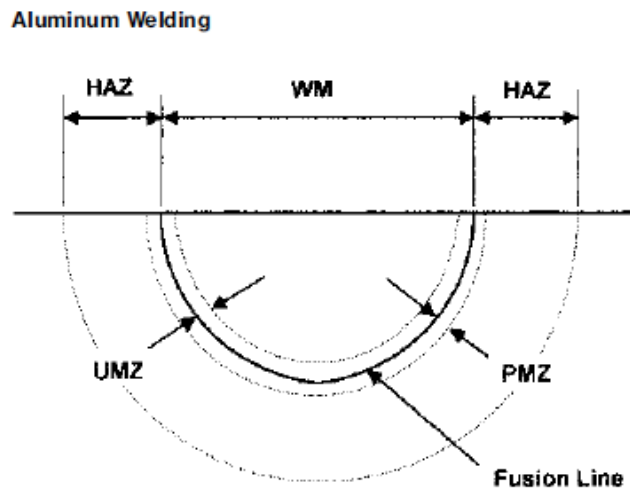


Figura 4. Definición de las diferentes zonas en una soldadura de aluminio. [1]

Se definen cada una de las zonas:

- **WM (weld metal):** su composición es una mezcla entre el material base y el material de aporte.
- **UMZ (unmixed zone):** justo dentro del borde de fusión. Zona perteneciente al baño de fusión, pero no tan afectada en cuanto a la mezcla materiales de aporte- material base.
- **HAZ (heat affected zone):** lugar donde la microestructura del metal base ha sido influenciada de alguna forma por el gradiente térmico. Estos cambios pueden incluir: "recovery", recristalización, crecimiento de grano y reacciones por precipitado.
- **PMZ (partially melted zone):** la región en la HAZ donde el pico de temperatura ha excedido el equilibrio de solidus o la temperatura eutéctica para los constituyentes presentes. Fusión en esta región incluye fusión equilibrada y fusión no equilibrada de constituyentes eutécticos a lo largo de los bordes de grano.

1.3.4. Defectologías.

A continuación, se describen los principales defectos típicos encontrados en la soldadura que podrán afectar en mayor o menor medida al comportamiento de la pieza soldada ante las diferentes sollicitaciones a las que se vea sometida.

- Falta de penetración en la raíz.

El aspecto será como una entalla o rendija en raíz. Las causas se deben principalmente a: nivel de corriente demasiado bajo, velocidad de soldeo demasiado alta, incorrecta preparación de la unión o arco demasiado largo. Los remedios ante la defectología serían: incrementar la intensidad, disminuir la velocidad de soldeo, incrementar el ángulo de chaflán, reducir el talón de la raíz o aumentar la separación en la raíz, reducir la longitud del arco, reducir el tamaño de los puntos o reducir la velocidad del caudal del gas de respaldo.



Figura 5. Falta de penetración en la raíz.

- Mordedura.

El aspecto del defecto es un canal a lo largo del borde de la soldadura. Las causas: corriente de soldeo demasiado alta, velocidad de soldeo demasiado alta o pistola inclinada lateralmente. Remedios ante esta defectología: reducción de la intensidad, reducción de la velocidad de soldeo o situar la pistola en un plano perpendicular a la chapa.



Figura 6. Mordedura.

- Grietas en el metal de soldadura.

Se podrán observar grietas a lo largo del centro de la soldadura. Causas: excesiva tensión transversal en soldaduras embriadas, relación profundidad/ancho demasiado baja, contaminación de las superficies o mal ajuste entre las piezas en las soldaduras en ángulo de forma que quedan aberturas largas. Como remedios: modificar proceso de soldeo para reducir las tensiones debidas al efecto térmico, ajustar los parámetros para trabajar con una relación profundidad/ancho 1:1, limpiar las superficies o mejorar el ajuste de las chapas en la unión.

- Falta de fusión en los bordes.

Este defecto no es visible normalmente, será detectable por medio de ensayos no destructivos o doblado lateral. Causantes: nivel de corriente demasiado bajo, velocidad de soldeo demasiado alta, ángulo del portaelectrodo incorrecto, posición no centrada respecto a los bordes, incorrecta preparación de la unión, diámetro de varilla excesivo para el espesor de chapa a soldar o limpieza insuficiente. Como soluciones a la defectología: incremento de la intensidad, disminución de la velocidad de soldeo, incremento del ángulo de chaflán, reducir el talón de la raíz o aumentar la separación en la raíz, reducir longitud del arco, inclinar el portaelectrodo hacia atrás y mantener el arco sobre el borde delantero de la gota de metal fundido, situar el portaelectrodo centrado respecto a los bordes de la unión, incrementar el ángulo de la unión, reducir el diámetro de la varilla o limpiar la superficie de las chapas.



Figura 7. Falta de fusión en los bordes.

- Porosidad.

Defectología más presente en el proceso de soldeo de Aluminio y sus aleaciones. El aspecto será poros superficiales y más normalmente subsuperficiales detectables por radiografiado. Las diferentes causas pueden ser: protección insuficiente, turbulencias en el gas de protección, defectuosa distribución de la protección de la unión, suciedad en la chapa o en la varilla de aporte, gas contaminado, pistola separada de la pieza, tobera demasiado estrecha, soldeo en campo (velocidad del viento elevada), ángulo de inclinación de la pistola demasiado pequeño o entrada del agua de refrigeración en el gas de protección por existir una fuga. Como remedios ante el defecto se tiene: incremento o ajustar caudal del gas de protección, protección completa del área de unión, limpieza y desengrase de las superficies y varillas, cambio de botellas de gas, purgar las líneas de gas antes de soldar, comprobar conexiones, empleo de tubos de cobre o neopreno, acercar pistola a la pieza, seleccionar tobera adecuada, ajuste de inclinación respecto al material base e inspeccionar periódicamente el

equipo de soldeo.



Figura 8. Porosidad.

- Inclusiones de Wolframio.

Esta defectología será apreciable mediante radiografías. Las inclusiones de wolframio tienen el mismo efecto que las entallas y son zonas de posible corrosión rápida. Causantes: contacto entre pieza y electrodo de wolframio, contacto entre varilla de aporte y electrodo de wolframio, intensidad excesiva tanto en el soldeo c.a. como en c.c. Como remedios posibles: separación del portaelectrodos de la pieza (disminuir la longitud libre del electrodo de Wolframio), introducción de la varilla en el baño de fusión sin tocar el electrodo y utilización de la intensidad adecuada.

- Raíz oxidada.

Se podrá apreciar óxido en la raíz de la soldadura. Las posibles causas son: falta de protección en la raíz u oxidación de la raíz. Como único remedio será el uso de gas de respaldo para la protección de la raíz.

1.4. Ensayos para la caracterización mecánica de la soldadura.

Para la caracterización de las uniones soldadas durante este estudio será necesaria la realización de ensayos destructivos, para ver el comportamiento mecánico de la unión soldada.

A continuación, se resumen los ensayos destructivos realizados y según que normativa son realizados.

Se van a llevar a cabo tres ensayos diferentes:

- **Ensayo de tracción.** Se realizará según la norma s/ AWS B2.1/B2.1M:2009-ADD1 Anexo B.3A o norma compatible.
- **Ensayo de dureza (Rockwell).** Se calculará una línea de dureza de cada cupón mediante la **escala HR15T**. Según norma I+D-E-140.

Además, se realizarán **metalografías** del cordón y de las zonas adyacentes al mismo, así como también análisis del tamaño de grano según la norma ASTM E112.

1.5. Clases de soldadura. (I+D-P-181)

La norma AEN16095 ha clasificado las piezas soldadas para aviación según su utilización en tres clases (I, II y III) y establece la responsabilidad para la clasificación de la pieza, así como, la ficha de soldadura, o REP según AEN10302, cuando se desee exigir controles o pruebas funcionales que no son de obligado cumplimiento según los criterios de calidad.

Se establecen a su vez tres niveles de aceptación: A, B y C.

- 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.

Las soldaduras de Clase I y II estarán controladas por el inspector de tal modo que pueda identificarse el operario que hizo la soldadura.

Según la clase de la soldadura será permitida un número máximo de reparaciones, a partir de tal número si la soldadura no cumple con los requisitos de calidad necesario la pieza será rechazada. El número máximo de reparaciones en función de la clase son:

- Clase I: una reparación.

- Clase II: dos reparaciones.
- Clase III: tres reparaciones.

2 OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN DEL TRABAJO

2.1. Objetivos

En este apartado se procede a establecer los objetivos que se pretenden alcanzar con la realización de este trabajo.

El principal objetivo del trabajo es estudiar la relación de los parámetros de soldadura con la defectología ocasionada y las propiedades mecánicas del mismo. Más concretamente, se verá cómo van a verse afectadas las propiedades mecánicas de la unión soldada cuando la soldadura haya pasado por 1, 2,3 o ningún proceso de reparación.

Además, también será estudiado el efecto que tiene realizar diferentes tratamientos térmicos como: maduración antes o después de realizar la reparación provocada del cordón de soldadura o maduración más solubilización antes o después de la realización de la reparación al cordón y alivio de tensiones.

Para las propiedades mecánicas de la unión soldada se realizarán ensayos de tracción y dureza. Esto permitirá tener conocimiento de cuantas reparaciones pueden ser realizadas a una unión soldada a tope de la aleación de aluminio 6061T4, sin que las propiedades mecánicas de la soldadura sean afectadas de forma considerable mediante una forma empírica.

Más allá de las propiedades mecánicas se pretende aumentar el conocimiento existente sobre la metalurgia de la soldadura con la consecución de reparaciones, cómo se ve afectado el tamaño de grano, cómo podría afectar la formación de eutéctico a la unión soldada, etc.

2.2. Motivación del trabajo.

La principal motivación para la realización del estudio es poder establecer relaciones empíricamente demostradas de cómo pueden afectar las reparaciones junto con tratamientos térmicos a las propiedades mecánicas de una placa soldada a tope.

Además, se quiere conocer el comportamiento metalúrgico de la soldadura ante las distintas casuísticas que han sido propuestas.

La búsqueda de claves para la optimización del proceso de reparación de una soldadura junto con los tratamientos térmicos más efectivos en cuanto a efectos en su comportamiento mecánico se refiere es parte también de la motivación para hacer este estudio.

3 CASOS DE ESTUDIOS PROPUESTOS

Para cumplir con los objetivos expuestos en el Punto 2, se plantean 24 casos de estudio aplicados en chapas de 1 mm de espesor. Además, se realizarán 6 de los casos más restrictivos (con 3 reparaciones) más la soldadura ideal para chapas de 3,2 mm de espesor. Teniendo en total un total de 31 casos.

3.1 Parámetros comunes de soldeo.

Todos los casos tienen en común los parámetros detallados a continuación, diferenciando entre los dos distintos espesores.

Todas las soldaduras serán realizadas de forma manual.

Para realizar el análisis comparativo se tomará como base los datos obtenidos de una soldadura considerada como ideal para la aleación de Aluminio elegida como material base de la soldadura (parámetros establecidos para la realización de una soldadura de las características indicadas por AIRGRUP).

3.1.1 Tipo de corriente.

En el soldeo del aluminio puede utilizarse corriente alterna convencional, con onda alterna cuadrada o con corriente continua en ambas polaridades.

La acción decapante que proporciona la corriente alterna está asociada al semiciclo en el que la corriente actúa en polaridad CCEP (corriente continua polaridad inversa). Para asegurar el reencendido del arco en dicho semiciclo se precisan fuentes de corriente con un alto potencial en vacío (125 V con gas argón), o en su lugar máquinas que permitan la superposición de una corriente de soldeo de alto voltaje y alta frecuencia, justo en el momento en que la corriente pasa por cero y se dirige al semiciclo CCEP.

El cebado del arco eléctrico puede efectuarse mediante raspado o por la utilización de alta frecuencia.

La corriente alterna se utiliza con argón como gas de protección o con mezclas de argón y helio con un mínimo del 50% de argón en la mezcla. La alúmina sobre la superficie del aluminio es eliminada por la acción decapante del arco eléctrico.

Cuando se suelda aluminio, normalmente es utilizada corriente alterna, ya que en la parte positiva de la onda se produce un efecto de decapado o limpieza de la alumina formado por el aluminio y en la parte negativa de la onda es cuando se consigue la fusión en sí del material de aporte junto con el material base.

Se soldará en **corriente alterna sinusoidal**.

Se va a regular el tiempo de cada semionda. Se puede elegir que la semionda negativa dure más tiempo consiguiendo mayor penetración o que la semionda positiva sea más larga, consiguiendo que el efecto de decapado o limpieza esté más acentuado. Se usan los siguientes parámetros:

En este caso se va a tomar un **balance** de un 23 %, lo cual va a indicar que el 23 % del período de la onda, esta onda va a tener un valor negativo. Con este valor predomina durante el ciclo el efecto limpiador de la parte positiva de la onda sinusoidal.

Tabla 3. Parámetros en corriente alterna para la realización de la soldadura.

Espesor	1 mm	3,2 mm
Intensidad máxima	70 Amperios	190 Amperios
Balance de onda	23 %	25%
Frecuencia	95 Hz	90 Hz

3.1.2 Gas de protección.

Para la realización de todas las soldaduras será usado como gas protector el Argón.

Este gas es el más utilizado en este tipo de soldaduras. Sus principales características son:

- Es inerte. No reacciona durante la soldadura.
- No es tóxico.
- Eficiente protección debido a su alta densidad.
- Cebado fácil y buena estabilidad del arco.
- Idóneo para pequeños espesores.
- Favorece la forma del cordón y penetración adecuada.

Con objeto de mejorar la protección al inicio y al final de la soldadura, se selecciona un tiempo de salida de gas de protección antes de cebar el arco, con esto se retira el aire que rodea el material base en la zona de cebado y se crea una atmósfera formada únicamente por gas de protección.

Más importante será la regulación del tiempo de salida de gas de protección después de la extinción del arco. Con esto se va a asegurar que el material de aporte recién depositado queda protegido perfectamente hasta que se enfría hasta una temperatura idónea. Con esto también se evita la contaminación del electrodo de tungsteno por oxidación de éste.

Para realizar las soldaduras durante este estudio, los parámetros relacionados con el gas de protección son los mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de soldeo relativos al gas de protección (Argón).

Espesor	1 mm	3,2 mm
Tiempo gas pre-flujo	0,5 segundos	0,5 segundos
Tiempo gas post-flujo	7 segundos	12 segundos
Caudal durante soldeo	9 litros/min	10 litros/min

3.1.3 Configuración unión.

La configuración para realizar la soldadura será de **tope-tope** entre dos chapas. Hasta para espesores de 4 mm no será necesario la preparación expresa de los bordes que intervienen en la unión soldada, aunque será importante la coincidencia de estos durante el soldeo para evitar la aparición de numerosas defectologías.

3.1.4 Material base de la soldadura.

Se utilizará para todos los casos como material base aleaciones de **Aluminio 6061T4**. Este es uno de los materiales más utilizados en el sector aeronáutico.

Este material es interesante de cara al estudio que se pretende realizar puesto que el aluminio es de los materiales que presentan más defectologías cuando se suelda. Por ello, pueden ser necesarias reparaciones para corregir estas o bien recurrir a tratamiento térmicos para mejorar sus características de soldeo.

3.1.5 Material de aporte.

Los factores que en primera instancia que se tienen en cuenta a la hora de seleccionar el aporte serían los siguientes:

- Proporcionar cordones libres de grietas.
- Resistencia mecánica o resistencia al desgaste.
- Ductibilidad del cordón.
- Temperatura de servicio
- Resistencia a la corrosión.
- Aspecto final después del anodizado.

El material de aporte será el mismo para todos los estudios, se elige el **4043** por motivos de compatibilidad para que la unión soldada tenga unas buenas propiedades mecánicas y ductiles.

La composición química de este es la mostrada en la Tabla 5.

Tabla 5. Composición química del material de aporte 4043.

Si	Zn	Mn	Cu	Al	Mg	Ti
4,5%-6%	0,1 % máx	0,05% máx	0,3% máx	Remanente	0,05% máx	0,2 % máx

El diámetro de la varilla para la realización del cordón a tope de la chapa con espesor de 1 mm es de **2 mm**. En condiciones normales de soldeo el diámetro sería menor para la unión tope-tope de dos chapas con un espesor de 1 mm, pero debido al sistema montado para la realización del cordón (con el objetivo de evitar las grandes deformaciones sufridas por el aluminio durante el proceso de soldeo, Figura 9), se requiere aumentar la intensidad máxima ya que el sistema absorbe mucho calor. Puesto que es una intensidad algo mayor que la normal, se necesita mayor aporte de material para evitar posibles perforaciones en la unión.

Para el caso de las chapas de espesor igual a 3,2 mm se usa una varilla del mismo material, pero con un diámetro de **2,4 mm**.

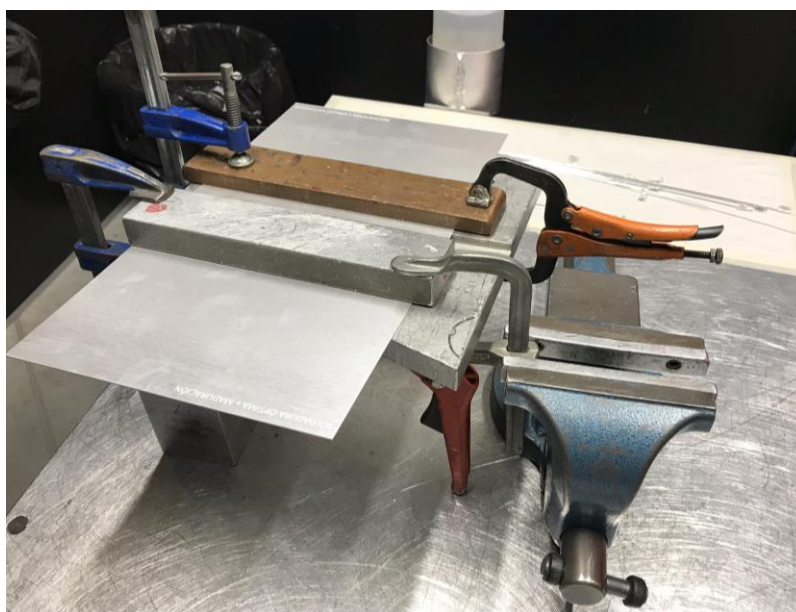


Figura 9. Disposición de elementos auxiliar para facilitar el soldeo junto con los cupones en configuración a tope.

3.1.6 Electrodo.

El electrodo de tungsteno usado tendrá un diámetro de **1,6 mm** y una longitud de 150 mm aleado con Circonio al 0,3% para el caso de las chapas de 1 mm de espesor, mientras que alcanzará un diámetro de 3,2 mm para el soldeo de las chapas de espesor igual a 3,2 mm.

La forma del extremo del electrodo es muy importante pues, si no es la correcta, existe el riesgo de que el arco eléctrico sea inestable. En general, es preferible seleccionar un electrodo tan fino como sea posible, con objeto de concentrar el arco y obtener de este modo un baño de fusión reducido, aunque un exceso también de punta puede provocar una concentración del arco demasiado elevada, hasta el punto de poder hacer una perforación de la unión durante la realización del cordón de soldadura.

3.2. Configuraciones no comunes.

Se presentan las configuraciones que van a diferenciar unos casos de otros.

3.2.1. Número de reparaciones.

De forma habitual, las reparaciones a una soldadura se aplican fundamentalmente en la recuperación de piezas y uniones soldadas con discontinuidades no aceptables producidas durante las diversas fases de su fabricación o durante el servicio.

Las discontinuidades que más comúnmente aparecen durante la fabricación de conjuntos soldados incluyen los poros, las inclusiones de escoria, las mordeduras, las faltas de fusión entre material de aporte y metal base o entre cordones, la falta de penetración y las grietas de solidificación.

Existen otros defectos que estando relacionados directamente con el soldeo no se revelan hasta 48 horas después de haberse efectuado este, como es el agrietamiento en frío asistido por hidrógeno en el metal de soldadura o zona afectada térmicamente, así como el desgarre laminar que puede presentarse en el metal base.

Para poder saber el efecto que tiene sobre una unión soldada la realización de una reparación se va a simular el efecto de la ejecución de la misma. El proceso de reparación se describe en los siguientes pasos:

1. Una vez terminado el cordón de soldadura a reparar, se procede al proceso de conformado de este.
2. Mediante la fresa mostrada en Figura 10 (derecha), se elimina todo el material sobrante de la soldadura. Este será todo el material que excede el grosor del espesor de las placas soldadas.
3. Una vez eliminado todo el material sobrante, mediante el cepillo de alambre Figura 10 (izquierda) se uniformiza toda la zona de unión, que posteriormente será sometida a la nueva soldadura. Se deja el mínimo material que garantiza la unión de las dos placas soldadas.



Figura 10. Herramientas utilizadas para el proceso de conformado durante las operaciones de reparación. Cepillo de alambre (izquierda), fresa (derecha).

Se van a considerar tres diferentes casos: habiendo realizado **1, 2 o 3 reparaciones** al mismo cordón.

3.2.2. Tratamientos térmicos.

Con el objetivo de ver el efecto que tienen los tratamientos térmicos sobre las propiedades mecánicas y defectología de un cordón de soldadura, se propone la realización de dos procesos: maduración más solubilización, maduración únicamente y alivio de tensiones.

Estos tratamientos se realizarán o antes o/y después de llevar a cabo las reparaciones correspondientes con el caso.

Hay que tener en cuenta que el material base si es tratable térmicamente pero el material de aporte no lo va a ser.

3.2.2.1. Maduración.

También llamado precipitación o envejecido. En esta etapa, el exceso del metal B existente en la fase tiende a coalescer (unirse o fundirse) en forma de granos de E uniforme distribuidos. Esta fase precipitada impide el movimiento de las dislocaciones (dificultan las deformaciones plásticas), haciendo subir el límite elástico del material.

La etapa de maduración se puede realizar:

- A temperatura ambiente: caso de la maduración natural.
- A una cierta temperatura: caso de la maduración artificial.

En este estudio se realiza una maduración artificial. Dependiendo del tamaño y la uniformidad de la fase dispersa se obtienen propiedades mecánicas distintas. En general interesa un precipitado fino y disperso, que aumentará la carga de rotura, el límite elástico y dureza, aunque se obtendrán valores ligeramente menores de alargamientos.

Con este tratamiento se consigue llevar el material a un tratamiento T6. Se someterán las probetas a una temperatura de **171°C-182°C**, durante un tiempo de entre **8 y 10 horas**. La especificación aplicable es la **I+D-P-220**.

3.2.2.2. Solubilización.

Partiendo de una aleación bifásica $\alpha + \epsilon$ de composición X, se calienta hasta alcanzar la temperatura θ , pasando a una única fase α . Se enfría muy rápidamente no dando lugar a la aparición de fenómenos difusivos, obteniendo una estructura en estado metaestable, ya que la solución sólida α contendrá un porcentaje B superior al de saturación.

Con este tratamiento térmico llevaremos la aleación de aluminio a T42. Se someterá el material de espesor de 1 mm a una temperatura de **525°C +/- 10°C** durante un tiempo de **35 minutos +/- 5 minutos**, mientras que el material de espesor de 3,2 mm de espesor se somete a una temperatura de **525°C +/- 10°C** durante un tiempo de **45 min +/- 5 min**. La especificación aplicable es la **I+D-P-220**.

3.2.2.3. Alivio de tensiones.

Los métodos térmicos de alivio de tensiones pueden dividirse en:

- Tratamientos completos en horno.
- Tratamientos locales.

En nuestro caso, se realizará un tratamiento completo en horno. En estos tratamientos, el conjunto soldado completo se introduce en un horno, por lo que el tratamiento se aplica a toda la pieza. En los hornos es necesario mantener el control de la distribución de temperaturas y flujo de calor, para lo que será necesario controlar los parámetros: velocidad de calentamiento, temperatura del tratamiento, tiempo de enfriamiento y velocidad de enfriamiento.

Para la realización del alivio de tensiones se someterá a las probetas a una temperatura de **144/155 °C** durante un tiempo máximo de **60 minutos**.

3.2.2.4. Soldadura.

El procedimiento de soldeo en sí, se puede considerar como un tratamiento térmico localizado, por lo que será importante conocer que pasa con el material cuando es sometido a este procedimiento para así poder entender los resultados que serán obtenidos durante el estudio.

Cuanto mayor es la velocidad de solidificación más fina es la estructura que se obtiene, que se caracteriza por una mayor resistencia mecánica y una menor tendencia al agrietamiento en caliente.

La anchura de la zona afectada térmicamente depende básicamente del aporte térmico y de la disipación del calor a través de las piezas que se están soldando.

El calor al que está sometido la ZAT produce la redisolución de tales microconstituyentes en la matriz, produciéndose a continuación, durante el enfriamiento una precipitación descontrolada que conduce al sobrevejecimiento de ciertas zonas en la ZAT, disminuyendo en estas la resistencia mecánica de la ZAT frente al metal base.

En este tipo de soldaduras, la zona justo adyacente al cordón sufre un rápido recocido de solubilización, presentando un nivel intermedio de resistencia mecánica y relativa ductibilidad. Cercana a esta zona existe otra en la que las temperaturas no son lo suficientemente altas como para producir un recocido de solubilización, pero si son superiores a las temperaturas de maduración. En esta zona se producen sobrevejecimientos y recocidos cuya intensidad depende del nivel de temperatura y el tiempo de permanencia a la misma. Esta zona se caracteriza por ser la que posee menores valores de resistencia mecánica. Tratamientos térmicos de maduración posteriores al soldeo tienen poco efecto sobre esta zona.

El espesor de la pieza puede tener un relevante papel en las propiedades de estas aleaciones en el estado bruto de soldeo. Puesto que los aportes térmicos necesarios para menores espesores también son menores, se reduce consecuentemente el tiempo a alta temperatura y con ello aumenta la resistencia mecánica de tales uniones.

3.3. Casos de estudio.

Tomando las cuatro variantes descritas en el apartado anterior y combinándolas se obtiene un total de 24 casos:

1. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón)).
2. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón) tras **1 REPARACIÓN**).
3. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón) tras **2 REPARACIONES**).
4. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón) tras **3 REPARACIONES**).
5. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón), con posterior **alivio de tensiones**).
6. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón), tras **1 REPARACIÓN** con posterior **alivio de tensiones**).
7. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón), tras **2 REPARACIONES** con posterior **alivio de tensiones**).
8. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón), tras **3 REPARACIONES** con posterior **alivio de tensiones**).
9. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón), con anterior **solubilización y maduración**).
10. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón), tras **1 REPARACIÓN** con anterior **solubilización y maduración**).

11. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón), tras **2 REPARACIONES** con anterior **solubilización y maduración**).
12. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón), tras **3 REPARACIONES** con anterior **solubilización y maduración**).
13. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón), con posterior **solubilización y maduración**).
14. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón), tras **1 REPARACIÓN** con posterior **solubilización y maduración**).
15. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón), tras **2 REPARACIONES** con posterior **solubilización y maduración**).
16. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón), tras **3 REPARACIONES** con posterior **solubilización y maduración**).
17. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón), con posterior **maduración**).
18. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón), tras **1 REPARACIÓN** con posterior **maduración**).
19. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón), tras **2 REPARACIONES** con posterior **maduración**).
20. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón), tras **3 REPARACIONES** con posterior **maduración**).
21. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón), con anterior **maduración**).
22. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón), tras **1 REPARACIÓN** con anterior **maduración**).
23. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón), tras **2 REPARACIONES** con anterior **maduración**).
24. Soldadura manual corriente alterna unión a tope entre Aluminios 6061T4 con aporte 4043. (Gas de protección (Argón), tras **3 REPARACIONES** con anterior **maduración**).

Además, los casos más críticos (con 3 reparaciones), serán estudiados con chapas del mismo material, pero de un espesor igual a 3,2 milímetros.

4 ANÁLISIS COMPARATIVO Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se va a proceder al análisis y discusión de todos los resultados obtenidos a partir de la realización de los cordones de soldadura y de sus posteriores ensayos destructivos y no destructivos.

4.1. Resultados y discusión de los ensayos destructivos.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los tipos de ensayos destructivos que se han realizado: tracción y dureza.

Para exponer los resultados obtenidos se clasifican los resultados en función del número de reparaciones a las que ha sido sometida la unión.

4.1.1 Resultados de los ensayos de tracción.

Como se ha indicado anteriormente los resultados del ensayo se van a dividir según el número de reparaciones. Para cada número de reparaciones se van a mostrar los resultados para 6 casos diferentes en cuanto a tratamientos térmicos, antes o después de la soldadura o ninguno:

- Tratamiento térmico original del material base. Ningún tratamiento adicional.
- Con posterior tratamiento de alivio de tensiones a la realización de la soldadura.
- Con anterior tratamiento de solubilización más maduración a la realización de la soldadura.
- Con posterior tratamiento de solubilización más maduración a la realización de la soldadura.
- Con posterior tratamiento de maduración a la realización de la soldadura.
- Con anterior tratamiento de maduración a la realización de la soldadura.

En cada ensayo de tracción realizado se obtienen las siguientes características:

- Carga de Rotura en Megapascascales (MPa).
- Límite Elástico en Megapascascales (MPa).
- Alargamiento en tanto por ciento (%).

Se realizan un total de **4 ensayos por cupón/caso de estudio**, obteniéndose el valor final de la media aritmética de todos los resultados.

4.1.1.1 0 Reparaciones (espesor = 1 mm)

Cuando no se somete el cordón a ninguna reparación, los resultados obtenidos de los ensayos de tracción son los mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados del ensayo de tracción con 0 reparaciones y espesor de chapa de 1 mm.

	CARGA DE ROTURA (MPa)	LÍMITE ELÁSTICO (MPa)	ALARGAMIENTO (%)
SIN TRATAMIENTOS TÉRMICOS	215,35	156,00	4,37
POSTERIOR ALIVIO DE TENSIONES	210,36	158,99	3,24
SOLUBILIZACIÓN + MADURACIÓN PREVIA	197,57	151,34	1,98
SOLUBILIZACIÓN + MADURACIÓN POSTERIOR	335,16	275,33	5,58
MADURACIÓN POSTERIOR	239,12	213,02	2,46
MADURACIÓN PREVIA	203,61	157,31	1,73

Sobre los resultados obtenidos para los ensayos de tracción que han sido sometidos a 0 reparaciones (Tabla 6), se puede destacar en primer lugar la notoria diferencia de la carga de rotura de las probetas que son sometidas a un tratamiento de solubilización más maduración artificial con respecto al resto de resultados que presentan unos valores menores con respecto a estos últimos.

Centrándonos en el límite elástico puede verse como se mantiene un valor aproximadamente igual para aquellos casos que no han sufrido un tratamiento térmico de endurecimiento posterior a la soldadura. Algo reseñable sería fijarnos en los valores del límite elástico cuando soldamos en T6 (con maduración o solubilización + maduración) ya que no difieren en su valor con respecto a los demás casos sin tratamientos térmicos de endurecimiento, lo cuál nos indica que el comportamiento elástico de la unión no se va a ver modificado si soldamos en T6 o en T4.

En cuanto a los alargamientos obtenidos tienen un rango relativamente bajo por lo que la rotura tiene un comportamiento bastante frágil, teniendo el máximo cuando se somete la unión a un tratamiento de solubilización más maduración.

4.1.1.2 1 Reparación (espesor = 1 mm)

En este apartado se presentan los resultados medios de los ensayos de tracción para cada una de los casos presentados con la simulación de 1 reparación, Tabla 7.

Tabla 7. Resultados del ensayo de tracción con 1 reparación y espesor de chapa de 1 mm.

	CARGA DE ROTURA (MPa)	LÍMITE ELÁSTICO (MPa)	ALARGAMIENTO (%)
SIN TRATAMIENTOS TÉRMICOS	196,76	159,56	3,83
POSTERIOR ALIVIO DE TENSIONES	194,87	148,07	2,74
SOLUBILIZACIÓN + MADURACIÓN PREVIA	191,22	146,29	2,49
SOLUBILIZACIÓN + MADURACIÓN POSTERIOR	219,17	157,94	0,11
MADURACIÓN POSTERIOR	207,33	176,89	0,89
MADURACIÓN PREVIA	204,62	156,61	3,56

Si comparamos entre sí los resultados mostrados para el caso de que la unión sea sometida a 1 reparación tal y como se ven en la Tabla 7. Lo primero a destacar sería que ya no encontramos tanta diferencia en la resistencia a la tracción entre aquellas que han sido tratadas mediante tratamientos térmicos de endurecimientos posteriores y las que no. Esto es debido a que ya con la 1ª reparación encontramos un fallo sumamente frágil para algunas de las probetas ensayadas sometidas a tratamientos térmicos posteriores de endurecimiento por precipitación. De ahí a que se encuentre una resistencia a la tracción menor que en el caso de 0 reparaciones.

De igual forma encontramos una reducción de los valores del límite elástico de estas dos casuísticas mencionadas

bajando en el caso de soldadura sometida a posterior solubilización más maduración a 157,94 MPa, valor medio del resto de casuística.

En cuanto a los alargamientos destacar los alargamientos menores al 1% de aquellas probetas que han rota mediante un fallo sin apenas deformación, fallo encontrado en el límite entre el metal de soldadura y el metal base.

4.1.1.3 2 Reparaciones (espesor = 1 mm)

En este apartado se exponen los resultados para los casos en los que el cordón de soldadura ha sido sometido a la simulación de dos reparaciones completas, Tabla 8.

Tabla 8. Resultados del ensayo de tracción con 2 reparaciones y espesor de chapa de 1 mm.

	CARGA DE ROTURA (MPa)	LÍMITE ELÁSTICO (MPa)	ALARGAMIENTO (%)
SIN TRATAMIENTOS TÉRMICOS	185,95	153,87	3,37
POSTERIOR ALIVIO DE TENSIONES	191,21	146,62	2,83
SOLUBILIZACIÓN + MADURACIÓN PREVIA	174,08	145,07	2,49
SOLUBILIZACIÓN + MADURACIÓN POSTERIOR	326,36	244,22	5,97
MADURACIÓN POSTERIOR	151,28	129,96	0,17
MADURACIÓN PREVIA	188,70	164,32	2,87

En el caso de 2 reparaciones (Tabla 8), lo más reseñable respecto al comportamiento entre casuísticas visto en los casos de 0 y 1 reparación sería la nueva subida de la resistencia a la tracción de aquella probeta sometida a solubilización más maduración posterior a la realización de la unión. Esto es debido a que en este caso no se aprecian roturas sumamente frágiles como podríamos encontrar en algunos casos de reparación.

Esto podría ser causado ya que el proceso de soldadura es un proceso manual en el que por cualquier motivo el cupón sometido a 1 reparación que posteriormente ha sido sometido a un proceso de solubilización más maduración ha sido más dañado que aquel que sometido a 2 reparaciones. Será un comportamiento a tener en cuenta durante el análisis y conclusión final.

Observando los alargamientos destacar al igual que en el caso de 1 reparación, el alargamiento promedio de 0,17% para el caso en el que se tiene una maduración posterior. Única casuística en la que para 2 reparaciones se observa una rotura extremadamente frágil a lo largo de la zona de unión entre metal de soldadura y metal base.

4.1.1.4 3 Reparaciones (espesor = 1 mm).

A continuación, se presentan los resultados del caso más restrictivos que es el que somete el cordón a 3 reparaciones, Tabla 9.

Tabla 9. Resultados del ensayo de tracción con 3 reparaciones y espesor de chapa de 1 mm.

	CARGA DE ROTURA (MPa)	LÍMITE ELÁSTICO (MPa)	ALARGAMIENTO (%)
SIN TRATAMIENTOS TÉRMICOS	171,62	150,91	3,39
POSTERIOR ALIVIO DE TENSIONES	188,15	163,47	2,71
SOLUBILIZACIÓN + MADURACIÓN PREVIA	186,07	158,97	1,10
SOLUBILIZACIÓN + MADURACIÓN POSTERIOR	216,6	163,3	0,85
MADURACIÓN POSTERIOR	127,50	127,58	0,61
MADURACIÓN PREVIA	186,00	141,21	2,92

El caso de 3 reparaciones (Tabla 9) teóricamente es el más restrictivo el que peores resultados va a dar ya que el material ha sido sometido a más tratamientos térmicos consecutivos de forma que la estructura y resistencia del material se ve modificada.

De forma general, se puede ver como se obtienen valores para las cargas de roturas menores que en el resto de casos con menos reparaciones con un reseñable deterioro de la resistencia de la probeta sometida a un posterior proceso de maduración artificial, llegando a tener un valor medio de 127,5 MPa, un 53 % menos de lo obtenido para el mismo caso con 0 reparaciones, lo cual muestra el gran deterioro de la unión. Soldada.

Ya con 3 reparaciones muestran roturas extremadamente frágil 4 de las 6 casuísticas propuestas: sin tratamientos térmicos adicionales, con posterior alivio de tensiones, con posterior maduración y con posterior solubilización más maduración. Los casos en los que no se observa rotura tan frágil son aquellos en los que se sueldan en un estado térmico T6. Es reseñable que, aunque se produce una rotura muy frágil, el valor de la carga de rotura para el caso de solubilización más maduración posterior sigue siendo superior al resto de las casuísticas.

Los valores de alargamientos obtenidos para los que son sometidos a tratamientos térmicos de endurecimiento posterior a la realización de la soldadura siguen siendo valores que apenas alcanzan el 1%.

4.1.1.5 0 y 3 reparaciones (espesor = 3,2 mm).

Con el objetivo de ver el comportamiento de la unión soldada para láminas de mayor espesor, se deciden tomar los casos más restrictivos con 3 reparaciones así como la soldadura óptima con 0 reparaciones en chapas que alcanzan el espesor de 3,2 mm. Los resultados obtenidos para el ensayo de tracción son los presentados en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados del ensayo de tracción con 0 y 3 reparaciones y espesor de chapa de 3,2 mm.

	CARGA DE ROTURA (MPa)	LÍMITE ELÁSTICO (MPa)	ALARGAMIENTO (%)
SIN TRATAMIENTOS TÉRMICOS (0 reparaciones)	196,94	127,05	9,01
SIN TRATAMIENTOS TÉRMICOS	171,39	126,93	7,45
POSTERIOR ALIVIO DE TENSIONES	175,43	128,85	7,29
SOLUBILIZACIÓN + MADURACIÓN PREVIA	194,19	149,17	5,31
SOLUBILIZACIÓN + MADURACIÓN POSTERIOR	308,65	229,19	8,93
MADURACIÓN POSTERIOR	184,51	131,34	5,04
MADURACIÓN PREVIA	189,71	132,80	5,82

Para estos últimos casos de mayor espesor (Tabla 10), los casos con posteriores tratamientos de endurecimiento muestran una mejoría de las cargas de roturas soportadas aunque aparece una probeta en cada uno de los dos casos que falla de forma muy frágil como encontrábamos en los casos con espesor de 1 mm.

El resto de valores se mantienen en unos valores muy similares a sus análogos con las probetas de 1 mm.

En cuanto a los valores del límite elástico se ven reducidos en los casos sin tratamientos térmicos de endurecimientos posterior pudiendo ser debido a que al ser más espesor el enfriamiento es más rápido por lo que se produce un endurecimiento natural más eficaz que supone una reducción de la ductibilidad y un aumento de la Resistencia. Aunque también puede ser debido a otros factores como la historia mecánica del cupón base. En cambio, los dos casos que si se someten presentan un aumento debido a la reducción de los casos con roturas extremadamente frágiles.

Los alargamientos que se tienen son considerablemente mayores que los obtenidos en las probetas de 1 mm de espesor.

4.1.1.6 Gráficas

En este apartado se van a exponer de forma gráfica los resultados obtenidos mediante los ensayos de tracción,

lo cual permitirá realizar un mejor análisis de los mismos.

En primer lugar, en la Figura 11 se muestran las cargas de rotura obtenidas para las distintas casuísticas en cuanto a tratamientos térmicos en función del número de reparaciones a las que han sido sometidos los cordones.

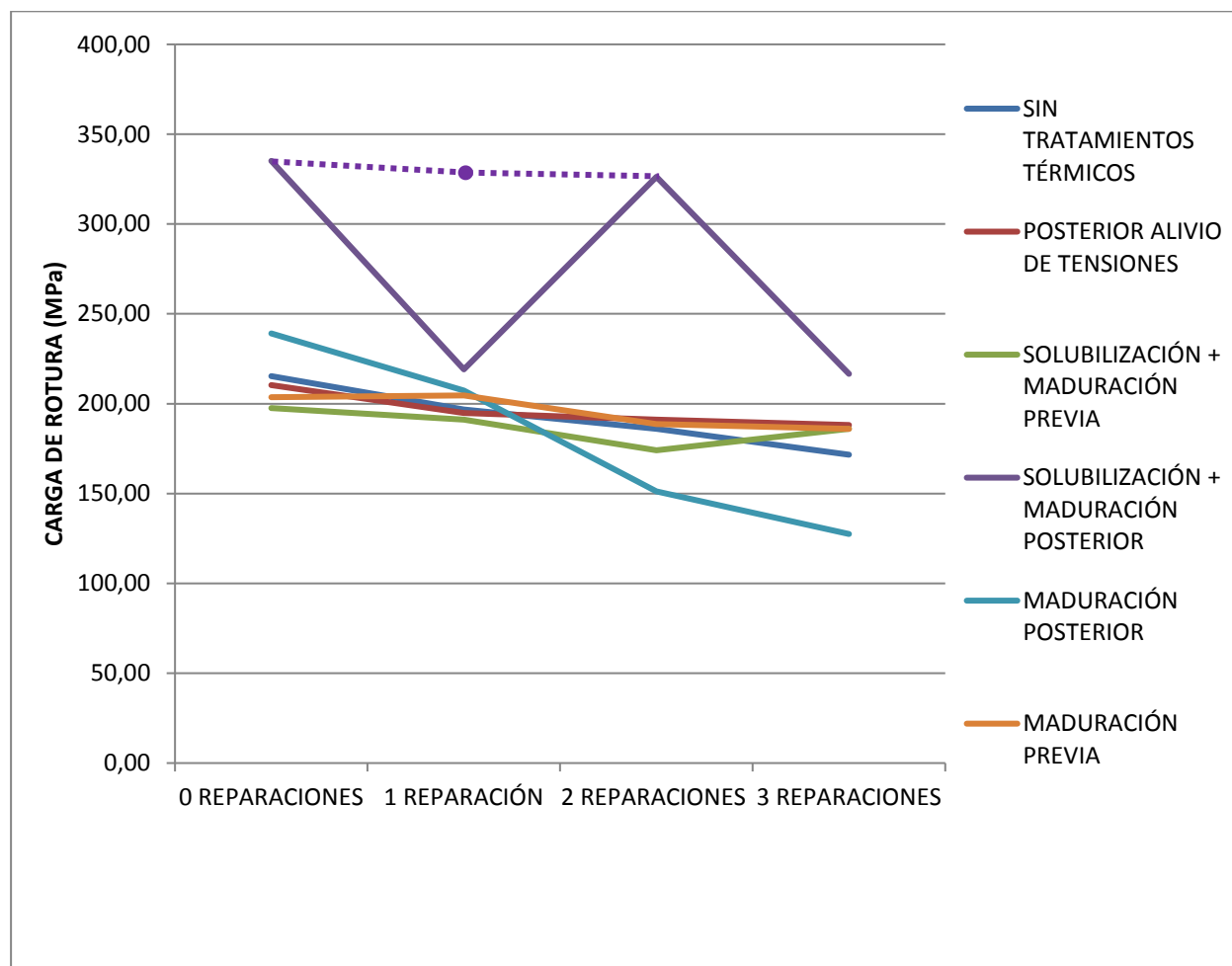


Figura 11. Cargas de rotura en Megapascales frente al número de reparaciones y para las diferentes combinaciones de tratamientos térmicos.

Con la representación mostrada en la Figura 11 se pueden analizar de forma global el comportamiento de la soldadura con la aplicación de diferentes tratamientos térmicos y con el paso del número de reparaciones sometidas por el cordon de soldadura.

En primer lugar, se puede ver el comportamiento generalizado de reducción de la resistencia a la tracción a medida que aumenta el número de reparaciones.

Por un lado destacar el comportamiento de la casuística con tratamiento posterior de solubilización más maduración en la que se puede ver una notable reducción para 1 reparación y para 3 reparaciones, a diferencia del caso de 2 reparaciones en el que no encontramos el fallo frágil de las otras dos casuísticas y el valor de la resistencia a la tracción se mantiene cercana a los niveles de aquel caso en el que no se tienen reparaciones, hecho posiblemente derivado del factor humano que es el que realiza la soldadura, por lo que se dibuja en línea discontinua el comportamiento hubiera sido esperado para ese caso.

Por otro lado, la Resistencia a la tracción que se vé más degradada con el sometimiento de la soldadura a reparaciones es el caso en el que se tiene un tratamiento térmico de maduración posterior.

A continuación, en la Figura 12 se muestran los valores de rotura porcentuados respecto al valor obtenido para la casuística de la que se ha considerado “soldadura óptima”, que será el caso de una soldadura sin ningún tratamiento térmico adicional así como ninguna reparación.

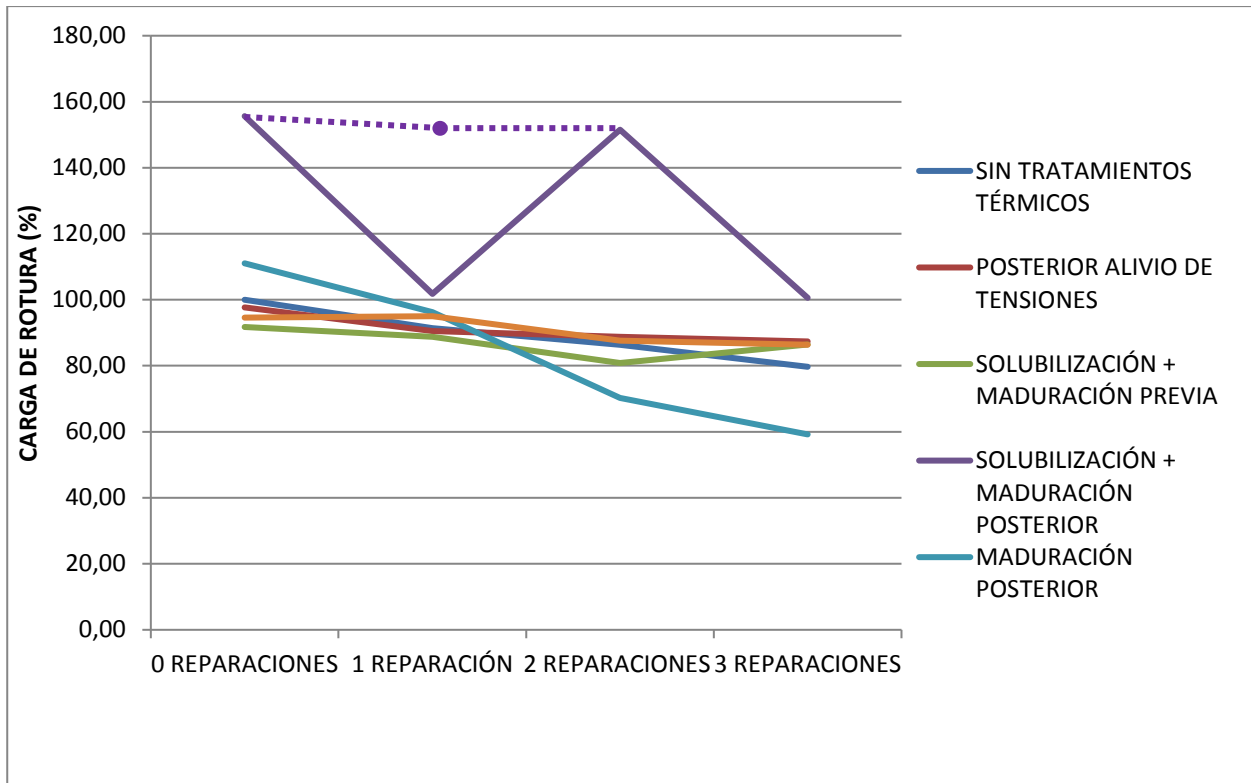


Figura 12. Cargas de rotura representadas en % respecto al valor tomado de la “soldadura óptima” para las distintas casuísticas propuestas para chapas de espesor igual a 1 mm.

En primer lugar, se puede ver en la Figura 12 como excepto para los casos en los que se realiza un tratamiento térmico de endurecimiento posterior para 0 reparaciones todos los demás casos presentan un valor menor al óptimo. Para el caso de soldadura con posterior solubilización más maduración se alcanza un valor de 155% y para el caso de solo maduración posterior un 111%.

Es destacable el comportamiento ya mencionado anteriormente en la Figura 11 para el caso de 1 reparación con posterior solubilización más maduración donde se alcanza un valor de 101 %.

Por otro lado el mayor deterioro se puede observar en el caso de realizar una maduración posterior a la realización de la soldadura, alcanzándose un valor del 59 % con respecto a la soldadura óptima.

Para el resto de casuística la reducción de la carga de rotura se encuentra en torno a los 10 puntos porcentuales respecto a su valor para 0 reparaciones.

Si ahora consideramos las probetas con espesor de 3,2 mm, tomando como referencia la soldadura sin ninguna reparación y sin tratamientos térmicos adicionales encontramos el comportamiento reflejado en la Figura 13.

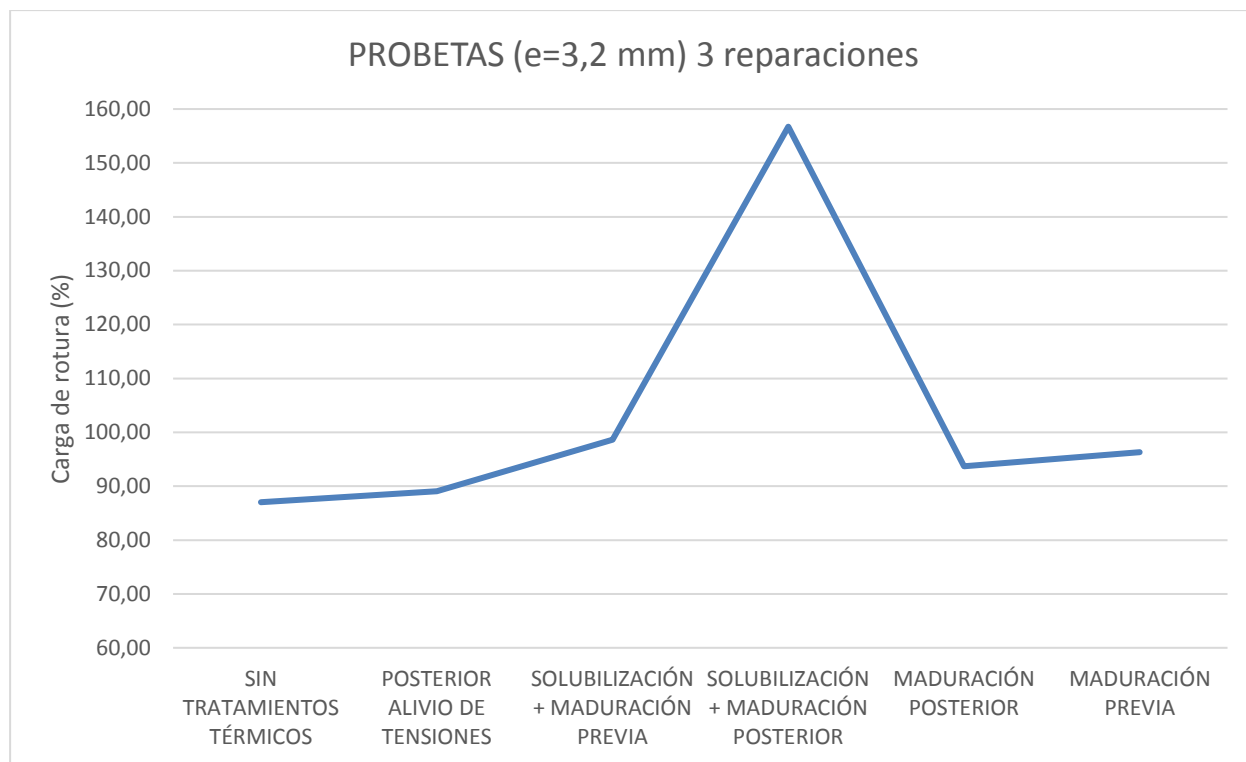


Figura 13. Cargas de rotura representadas en % respecto al valor tomado de la “soldadura óptima” para las distintas casuísticas propuestas para chapas de espesor igual a 3,2 mm.

Si se analizan los resultados obtenidos con espesor 3,2 mm (Figura 13) a los obtenidos con espesor 1 mm con 3 reparaciones que se presentaron en la Figura 12 generalmente se puede decir que el deterioro de las propiedades es considerablemente mejor. Dándose un mínimo de un 87 % para el caso en el que no se aplican tratamientos térmicos adicionales.

CRITERIO DE ACEPTACIÓN

Con el objetivo de establecer un criterio con el que decir que casuísticas podemos considerar como aptas, se establece un valor aproximado en base a la experiencia de la empresa en el sector de un -10 % de aceptabilidad respecto a la soldadura que se ha considerado óptima y a partir de la cuál se calculan los valores ya reflejados en la Figura 12.

De esta forma de los casos de estudio propuestos para espesores de chapa de **1 mm** consideraríamos como APTOS los siguientes:

- Para 0 reparaciones: todas las casuísticas son aptas.
- Para 1 reparación: todas las casuísticas aptas excepto la que se realiza el proceso de solubilización más maduración previo a la realización de la soldadura en la que se alcanza un valor de un 88,8%.
- Para 2 y 3 reparaciones: solo son aceptables aquellas con maduración + solubilización posterior a la soldadura.

En cuanto a los casos APTOS bajo el criterio en las casuísticas propuestas con espesores de chapas de **3,2 mm**, quedarían sólo fuera con 3 reparaciones el caso en el que no se le aplica ningún tratamiento adicional con un 87 % y el caso con posterior alivio de tensiones con un 89 %.

4.1.2 Resultados de los ensayos de dureza.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos para las distintas líneas de dureza realizadas.

Una línea de dureza es una serie de medidas de dureza realizadas a lo largo de la soldadura en una línea perpendicular a la dirección del cordón. Se puede hacer en la superficie de la soldadura o bien en la sección transversal. La línea de dureza es una herramienta para ayudar en la identificación de las zonas débiles de la soldadura. También ayuda a definir la extensión de la ZAT.

La línea de dureza constará de 13 medidas, referenciadas respect al centro del cordón de soldadura. Sera tomada la dureza desde uno de los lados del cordón de soldadura hasta el otro opuesto.

Para cada uno de los casos, en cuanto a variaciones de los tratamientos térmicos aplicados a la union, será mostrada una representación gráfica en la que a su vez se dividen las líneas de dureza en función del número de reparaciones a las que ha sido sometida la soldadura.

Es necesario tener en cuenta cada aleación tiende a tener un perfil en su línea de dureza diferente. Las aleaciones de media resistencia (6xxx y 7xxx) dependen principalmente del endurecimiento por precipitación para su resistencia. Mientras que ambos tipos de aleación muestran una maduración post-soldeo, la aleación de la serie 6xxx mantiene la ZAT como su zona más débil, Figura 14.

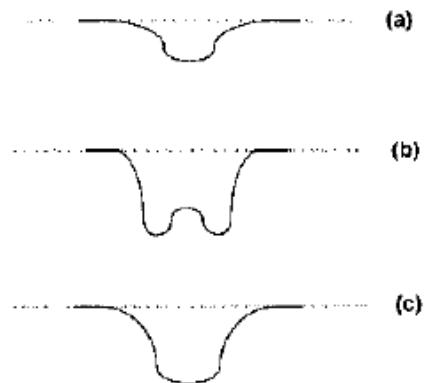


Figura 14. Línea de dureza esquematizada para las series de aluminio 5xxx (a), 6xxx (b) y 7xxx (c). [1]

Dada las dimensiones de las probetas analizadas se decide usar una escala de dureza Rockwell HR15T. Se utiliza un indentador de 1/16", aplicando una fuerza durante el ensayo de 15 kgf.

De cara a poder dar una mejor explicación de los resultados obtenidos en los ensayos de dureza, así como posteriormente en el apartado de conclusiones de los resultados obtenidos en los ensayos de tracción y análisis metalográficos, a continuación, se muestran tablas donde se resume las distancias a las que han roto las probetas sometidas a cada una de las casuísticas tratadas. Cuando es indicado a/c quiere decir que se produce la rotura justo en la zona adyacente de unión entre el metal base y el metal de soldadura.

En caso de mostrarse un intervalo quiere decir que la rotura no ha sido en una dirección totalmente paralela a la línea de cordón, por lo que se da el valor mínimo y máximo de las distancias a centro del cordón.

Tabla 11. Distancias de rotura en mm registradas para cada una de las probetas con 0 reparaciones y espesor de chapa de 1 mm.

0 REPARACIONES (espesor = 1mm)	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	PROBETA 4
SIN TRATAMIENTOS TÉRMICOS	7,50	7,00	7,50	8,00
POSTERIOR ALIVIO DE TENSIONES	8,00	8,00	8,00	8,50
SOLUBILIZACIÓN + MADURACIÓN PREVIA	7,00	7,00	7,50	7,00
SOLUBILIZACIÓN + MADURACIÓN POSTERIOR	5--12	7--11	11--21	5--8
MADURACIÓN POSTERIOR	7,00	7,00	7,50	7,50
MADURACIÓN PREVIA	7,00	7,00	7,50	7,00

Tabla 12. Distancias de rotura en mm registradas para cada una de las probetas con 1 reparación y espesor de chapa de 1 mm.

1 REPARACIÓN (espesor = 1mm)	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	PROBETA 4
SIN TRATAMIENTOS TÉRMICOS	7,50	8,00	8,00	7,50
POSTERIOR ALIVIO DE TENSIONES	8,00	7,50	8,00	8,00
SOLUBILIZACIÓN + MADURACIÓN PREVIA	7,50	7,50	9,00	8,00
SOLUBILIZACIÓN + MADURACIÓN POSTERIOR	a/c	5 --15	a/c	a/c
MADURACIÓN POSTERIOR	a/c	8,00	8,00	8,50
MADURACIÓN PREVIA	7,00	7,50	7,00	8,00

Tabla 13. Distancias de rotura en mm registradas para cada una de las probetas con 2 reparaciones y espesor de chapa de 1 mm.

2 REPARACIONES (espesor = 1mm)	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	PROBETA 4
SIN TRATAMIENTOS TÉRMICOS	8,00	7,50	7,50	8,00
POSTERIOR ALIVIO DE TENSIONES	8,00	8,00	9,00	8,00
SOLUBILIZACIÓN + MADURACIÓN PREVIA	8,00	7,50	8,00	7,00
SOLUBILIZACIÓN + MADURACIÓN POSTERIOR	9--15	10--18	8--14	12--18
MADURACIÓN POSTERIOR	a/c	a/c	a/c	a/c
MADURACIÓN PREVIA	8,00	7,50	7,50	7,00

Tabla 14. Distancias de rotura en mm registradas para cada una de las probetas con 3 reparaciones y espesor de chapa de 1 mm.

3 REPARACIONES (espesor = 1mm)	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	PROBETA 4
SIN TRATAMIENTOS TÉRMICOS	a/c	8,50	8,00	a/c
POSTERIOR ALIVIO DE TENSIONES	8,00	8,00	a/c	a/c
SOLUBILIZACIÓN + MADURACIÓN PREVIA	8,00	7,50	7,50	7,00
SOLUBILIZACIÓN + MADURACIÓN POSTERIOR	a/c	a/c	a/c	a/c
MADURACIÓN POSTERIOR	a/c	a/c	a/c	a/c
MADURACIÓN PREVIA	8,00	8,50	8,00	8,00

Para el caso de las placas de 1 mm se puede observar como la rotura se da en torno a los **8 mm** de media desde el centro del cordón.

Tabla 15. Distancias de rotura en mm registradas para cada una de las probetas con 0 reparaciones y espesor de chapa de 3,2 mm.

0 REPARACIONES (espesor = 3,2 mm)	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	PROBETA 4
SIN TRATAMIENTOS TÉRMICOS	13,50	13,00	13,00	14,00

Tabla 16. Distancias de rotura en mm registradas para cada una de las probetas con 3 reparaciones y espesor de chapa de 3,2 mm.

3 REPARACIONES (espesor = 3,2 mm)	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	PROBETA 4
SIN TRATAMIENTOS TÉRMICOS	13,00	13,00	13,00	13,00
POSTERIOR ALIVIO DE TENSIONES	13,00	13,00	14,00	13,00
SOLUBILIZACIÓN + MADURACIÓN PREVIA	12,00	12,00	11,00	11,00
SOLUBILIZACIÓN + MADURACIÓN POSTERIOR	10--16	a/c	15,00	15,00
MADURACIÓN POSTERIOR	12,00	12,50	13,00	a/c
MADURACIÓN PREVIA	10,00	11,00	12,00	11,00

En el caso de las probetas ensayadas con espesor de 3,2 mm se encuentra que la distancia de rotura media está en torno a los **13 mm**.

Ahora se presentan las líneas de dureza para cada uno de los casos estudiados.

- CASO SIN TRATAMIENTOS TÉRMICOS ADICIONALES.

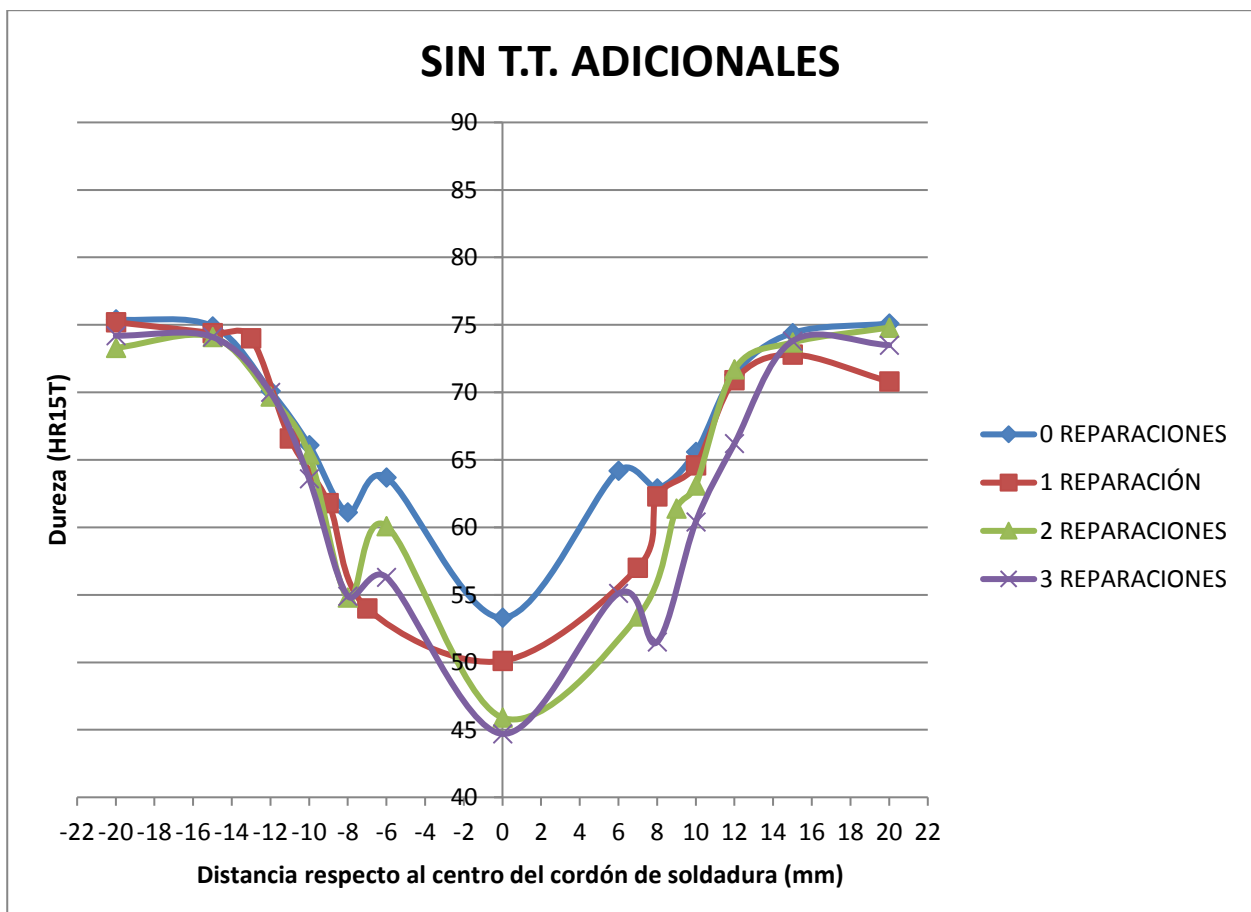


Figura 15. Línea de dureza para el caso sin tratamientos térmicos adicionales con la variación del número de reparaciones simuladas.

En la Figura 15 puede observarse que la zona afectada térmicamente ocupa unos 12 mm desde el centro del cordón de soldadura a ambos lados del cordón.

Se alcanza un mínimo generalizado en torno a 8 o 9 mm del cordón de soldadura, que es por donde rompen la

mayoría de las probetas de estas casuística, excepto para 2 probetas con 3 reparaciones, que se produce una rotura muy frágil en la zona de unión entre el metal de soldadura y el metal base. Fotos de las probetas rotas son mostradas en el Anexo I.

El valor obtenido para el cordón de soldadura se reduce con el número de reparaciones con unos valores que oscilan desde 53,7 hasta 44,3 HR15T.

En cuanto al metal base tendría un valor de aproximadamente 75 HR15T.

- CASO CON POSTERIOR ALIVIO DE TENSIONES

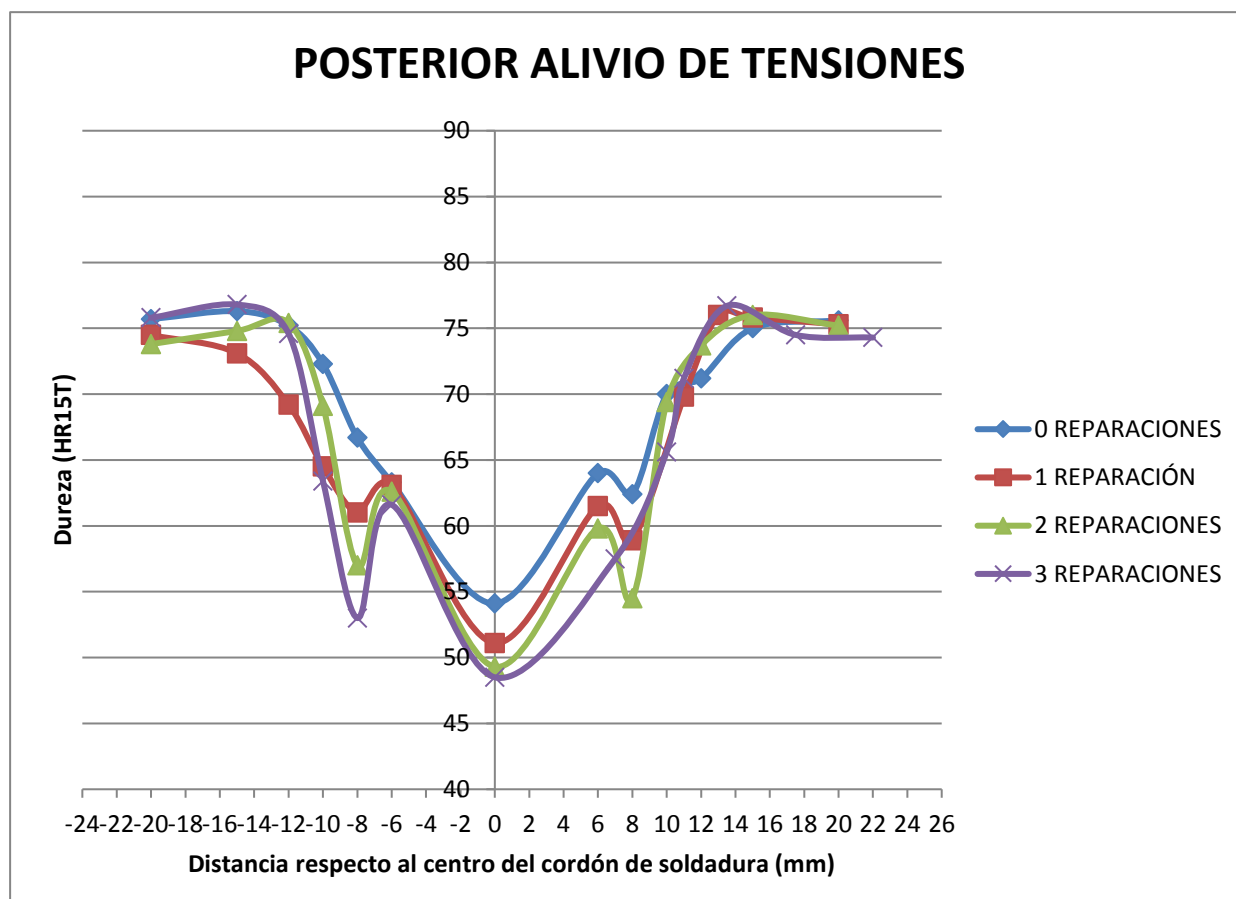


Figura 16. Línea de dureza para el caso con posterior alivio de tensiones con la variación del número de reparaciones simuladas.

En este caso, el mostrado en la Figura 16 encontramos un comportamiento similar al anterior, en el que el valor de dureza del material base apenas se ve modificado por el tratamiento térmico de Alivio de tensiones, al igual que los valores sin reparaciones de la dureza del metal de soldadura.

La ZAT mantiene su longitud de influencia igual que en el caso anterior.

Por otro lado, se puede apreciar que las líneas de dureza entre las diferentes condiciones de reparaciones se encuentran algo más juntas que en el caso anterior.

También se puede encontrar un mínimo generalizado en torno a 8 mm desde el centro del cordón.

Se tienen 2 probetas para 3 reparaciones las cuales presentan una rotura frágil justo en la zona límite del cordón de soldadura.

- CASO CON POSTERIOR TRATAMIENTO DE MADURACIÓN

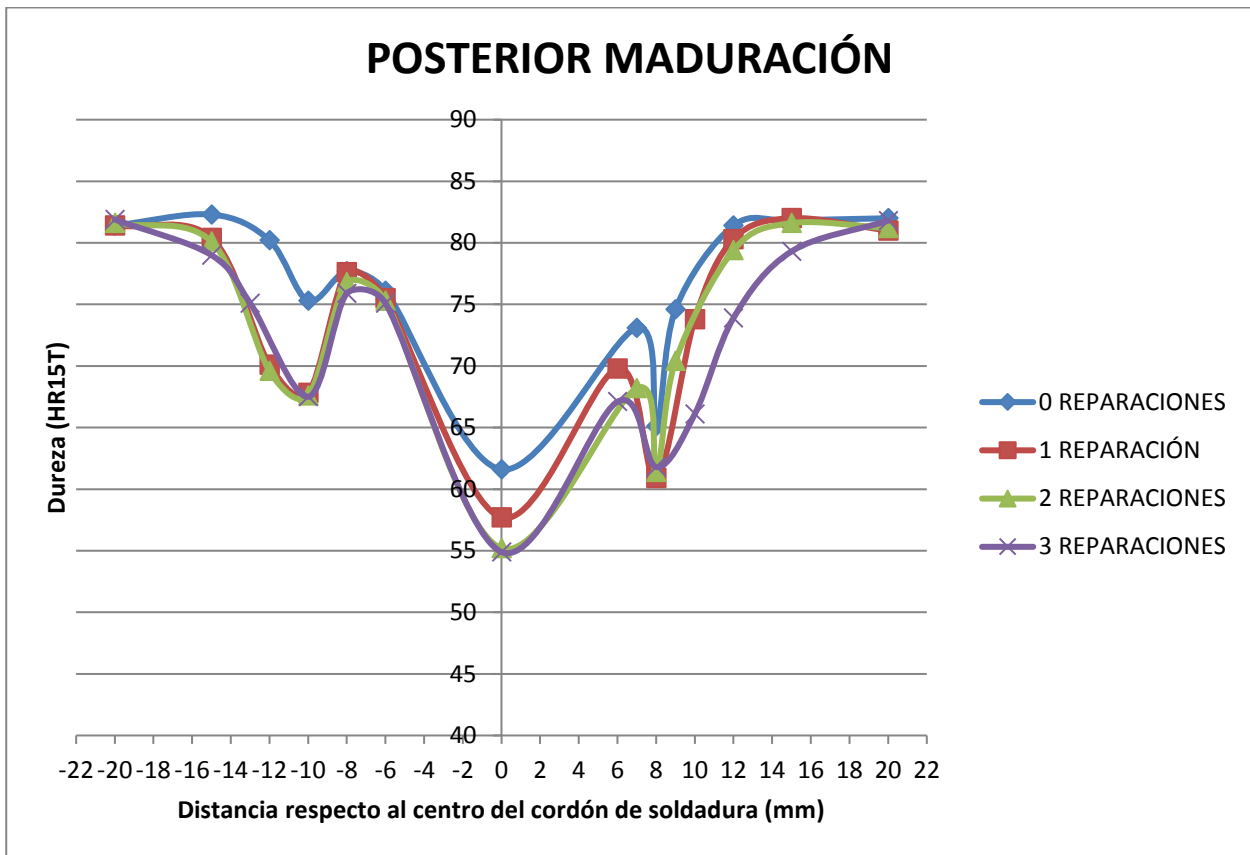


Figura 17. Línea de dureza para el caso con posterior maduración con la variación del número de reparaciones simuladas.

Se puede ver en la Figura 17 como debido al posterior tratamiento de maduración se tiene un aumento generalizado de los valores de dureza con respecto a los dos casos anteriores. La ZAT alcanza unos 13 mm a ambos lados del cordón de soldadura.

El metal base en estado T6 alcanza un valor de dureza de unos 82,5 HR15T, así como el metal de soldadura muestra una dureza que oscila entre los 63 y 55 HR15T.

Aunque muestra también mínimos generalizados a una distancia aproximada de 9 mm desde el cordón de soldadura, este es el caso en el que más se puede ver una rotura extremadamente frágil en la zona adyacente entre metal base y metal de soldadura, justo en la terminación del cordón de soldadura.

Se tienen hasta 9 probetas que presentan este tipo de roturas.

- CASO CON ANTERIOR TRATAMIENTO DE MADURACIÓN

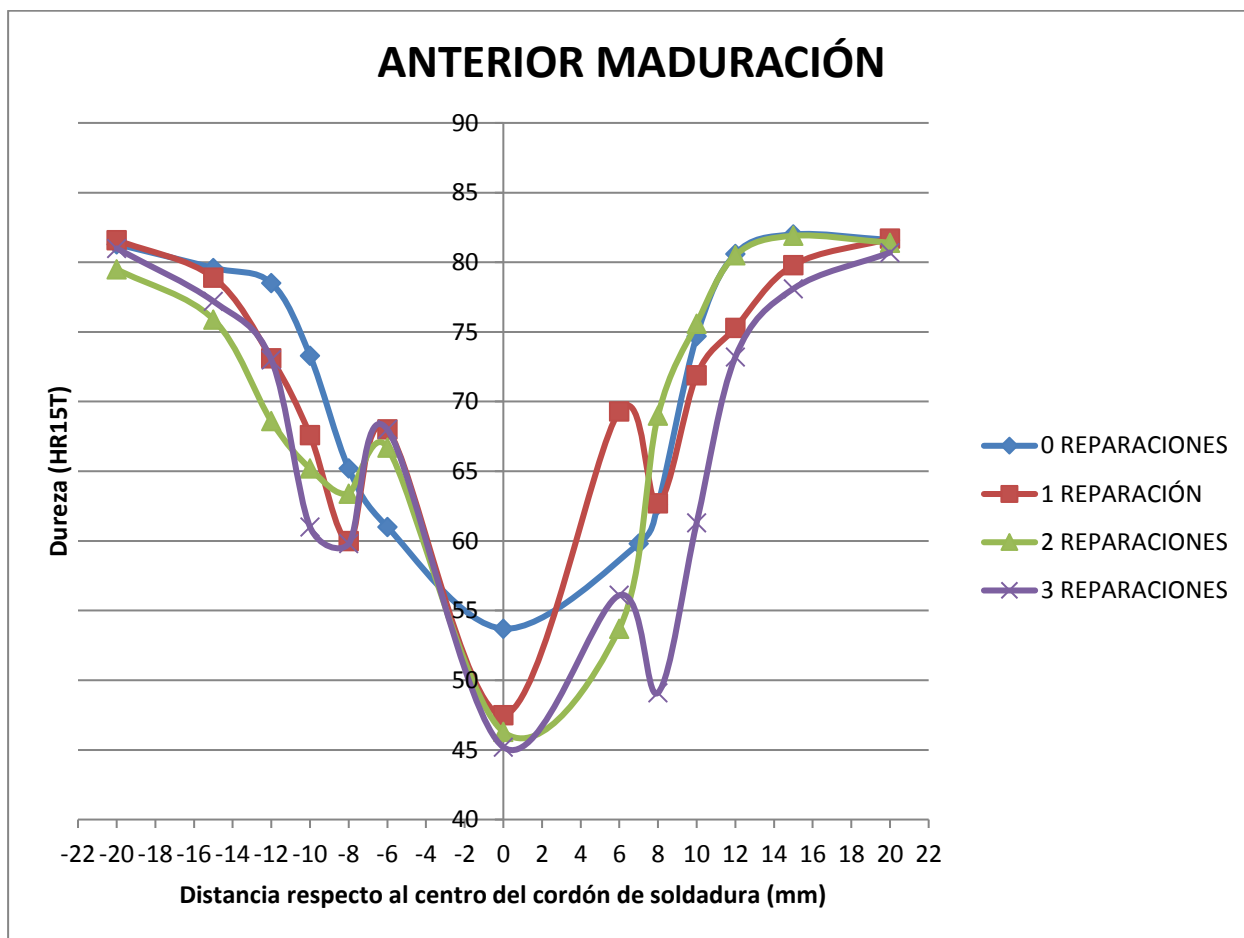


Figura 18. Línea de dureza para el caso con anterior maduración con la variación del número de reparaciones simuladas.

En este caso, el representado en la Figura 18, se suelda el material en un estado T6, aunque el material de aporte sigue estando en un estado T0 por lo que en primer lugar se puede observar como tenemos un rango de durezas más elevados. Se tiene igual que en el caso anterior una dureza del material base de unos 82 HR15T, así como tenemos una variación de la dureza del metal de soldadura desde los 45 a los 54 HR15T, coincidiendo de forma aproximada con los dos primeros casos vistos (sin tratamientos térmicos adicionales y con posterior alivio de tensiones).

Se sigue observando una tendencia de reducción en la dureza aunque se pueden ver como el comportamiento en la ZAT de la dureza es diferente para cada una de las casuísticas en cuanto a número de reparaciones simuladas se refiere.

Para esta casuística no se tiene ninguna probeta en la que se el un fallo extremadamente frágil.

- CASO CON POSTERIOR SOLUBILIZACIÓN MÁS MADURACIÓN.

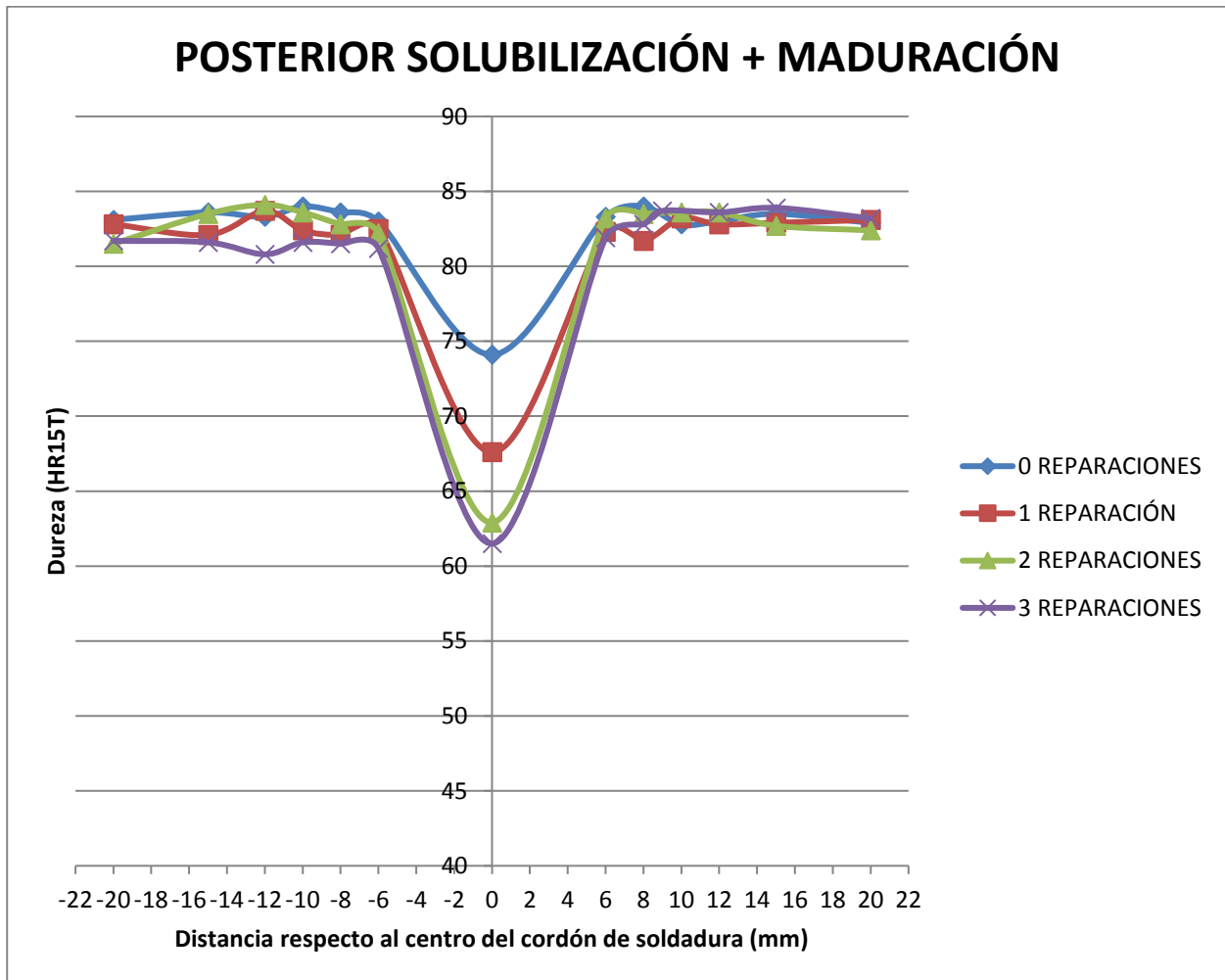


Figura 19. Línea de dureza para el caso con posterior solubilización más maduración con la variación del número de reparaciones simuladas.

En la Figura 19 se muestra la distribución de dureza para el caso con posterior solubilización más maduración. Es el más parecido al ideal el cual sería una línea recta. El hecho que después de la soldadura se someta todo a un tratamiento de solubilización previo a la maduración hace que la zona afectada térmicamente y todo el material quede en un estado de solubilización homogéneo que posteriormente con la maduración se consigue tener un estado térmico en T6 en todo el material de la unión.

El material base presenta una dureza de aproximadamente 82 HR15T. Para el cordón de soldadura encontramos unos valores que oscilan entre 74 y 62 HR15T donde el menor valor se da para el caso de 3 reparaciones y el mayor valor para el caso de 0 reparaciones. Este efecto será debido a que a medida que se simulan más reparaciones, la cantidad de material de aporte que contiene el metal de soldadura es mayor por lo que la dureza tiende a acercarse al valor nominal del 4043 en estado térmico T6.

Para este caso encontramos 7 probetas que rompen de manera extremadamente frágil en la misma zona anteriormente mencionada.

- CASO CON ANTERIOR SOLUBILIZACIÓN MÁS MADURACIÓN.

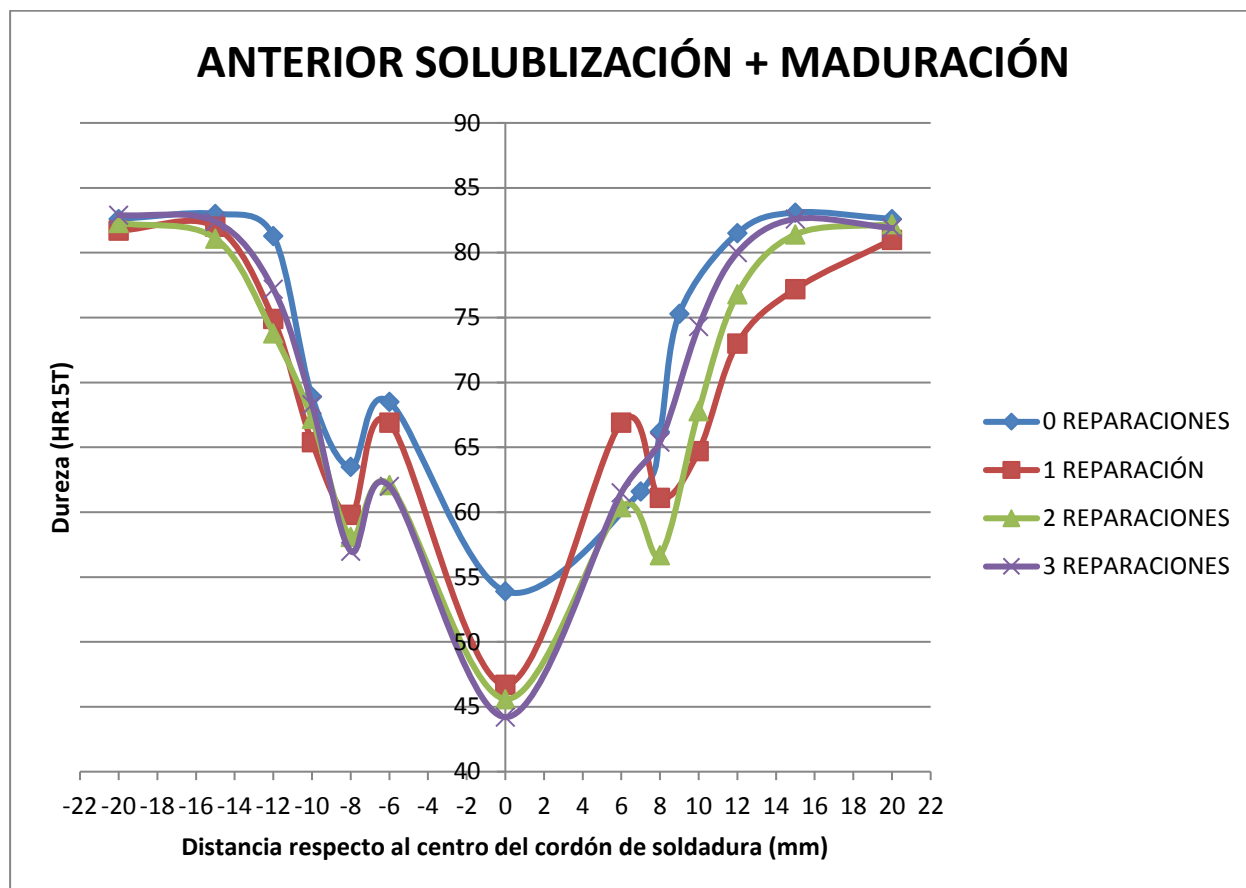


Figura 20. Línea de dureza para el caso con posterior solubilización más maduración con la variación del número de reparaciones simuladas.

Para este caso de línea de dureza mostrado en la Figura 20 se obtienen unos resultados muy similares a los obtenidos en el caso en el que sólo se tiene una maduración previa sin un tratamiento previo de solubilización. Esto es debido a que el metal base está todo en un estado térmico T4 entonces cuando realizas el endurecimiento por maduración artificiales puedes asegurar que todo el material existente va a pasar a un estado térmico T6 sin necesidad de la solubilización.

Para esta casuística no encontramos casos en los que se produzca una rotura extremadamente frágil.

Ahora tomando las casuísticas consideradas como aptas en el apartado anterior se realiza un análisis en conjunto diferenciando entre los casos aptos con 0 reparaciones (Figura 21) y 1 reparación (Figura 22).

En base a estas gráficas podemos decir que el caso más ventajoso en cuanto a dureza en ambos casos sería el caso con el tratamiento de **solubilización más maduración posterior**, (mostrado solitariamente en la Figura 19). En cuanto a la forma se pueden observar comportamientos similares con una ligera variación del mínimo de dureza en la ZAT en cuanto a distancia respecto al centro del cordón de soldadura.

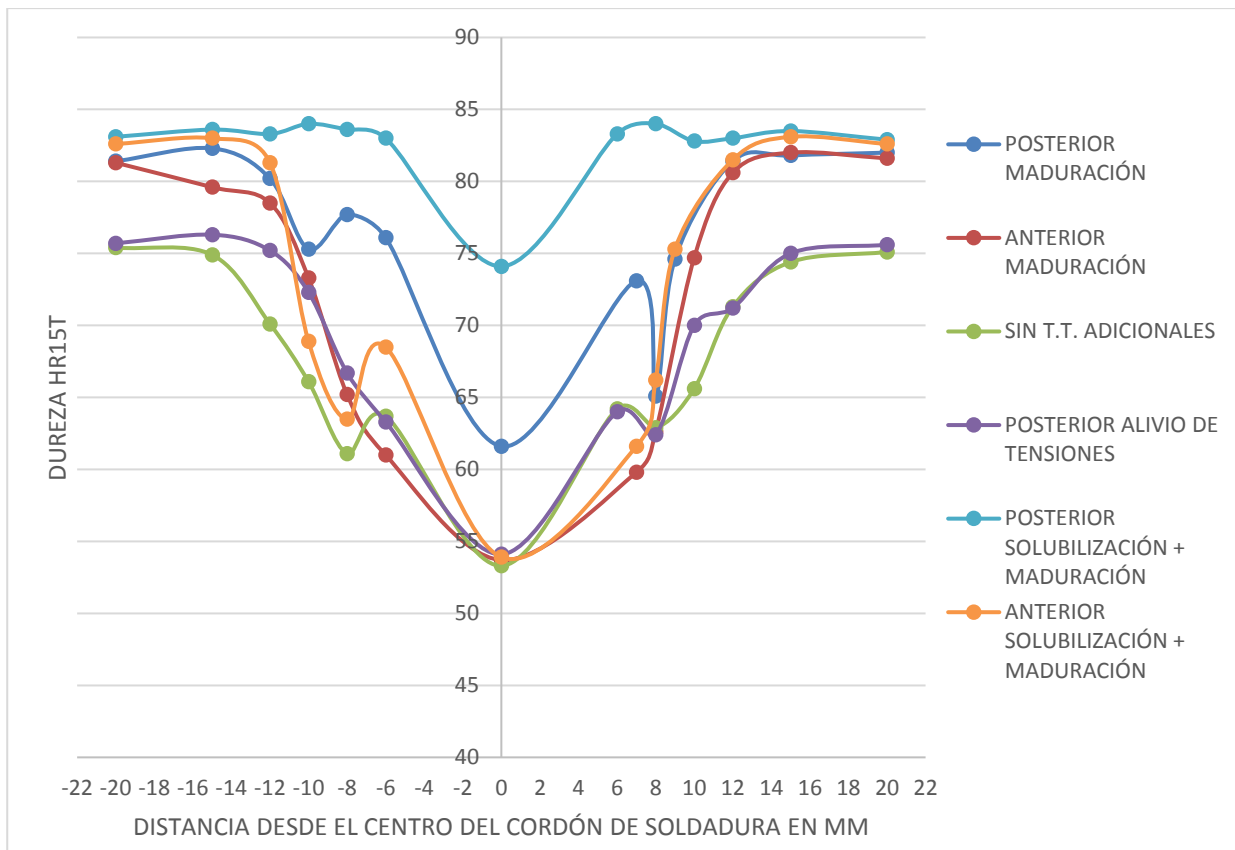


Figura 21. Línea de dureza para casos aceptados con 0 reparaciones.

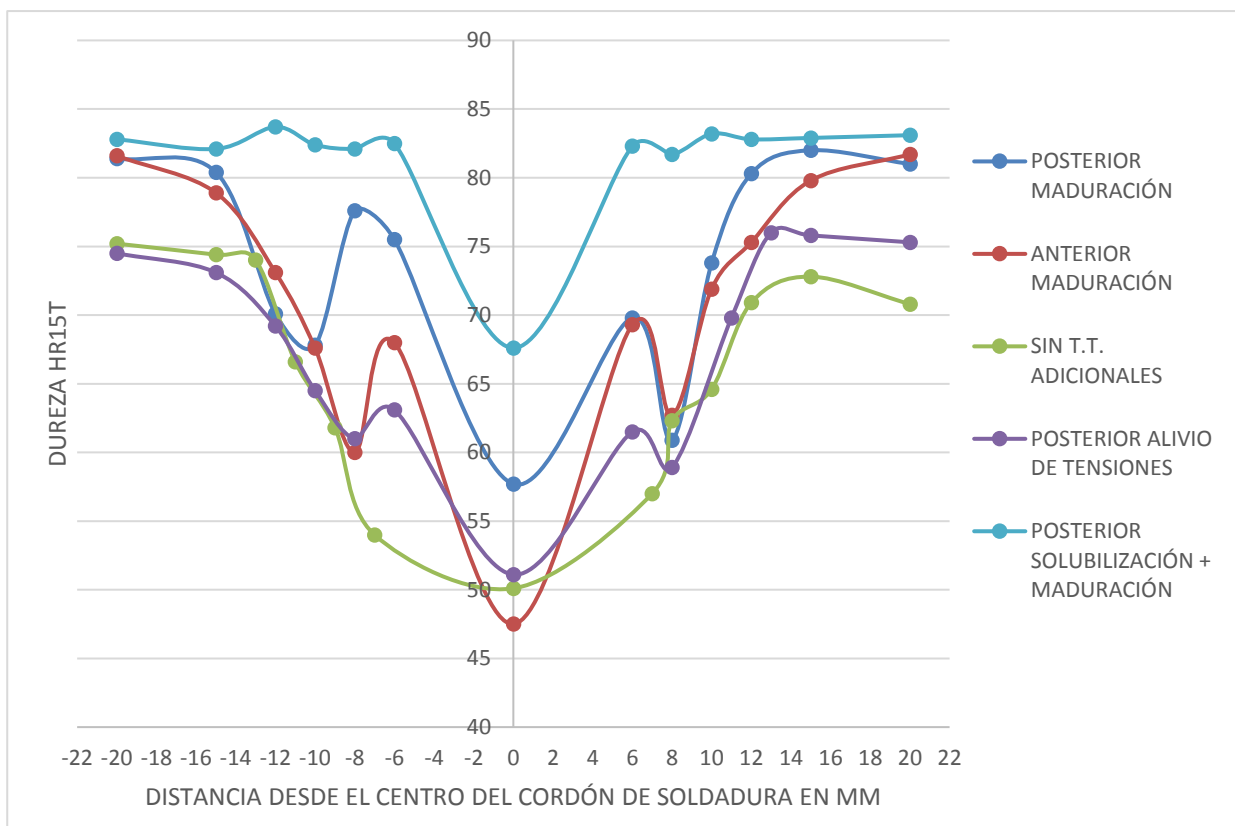


Figura 22. Línea de dureza para casos aceptados con 1 reparación.

No son realizadas las líneas de durezas completas de las probetas con espesor de 3,2 mm pero se realizan

medidas del material base y del metal de soldadura presentando valores similares a los obtenidos en los casos de 1 mm de espesor.

La zona de rotura es más alejada del centro del cordón de soldadura debido a que la transferencia de calor del aluminio por conducción es mayor a medida que se aumenta la sección transversal por lo que la ZAT será mayor y la zona con un mínimo de dureza se encuentra más alejado del centro del cordón.

4.2. Metalografías.

Prestando atención a la teoría publicada sobre las aleaciones de aluminio se deduce que los motivos por los que se puede producir la rotura extremadamente frágil en la zona adyacente entre el metal de soldadura y el metal base serían 3:

- Aumento del tamaño de grano: el aumento del tamaño de grano a medida que aumenta el número de reparaciones a las que se somete el cordón de soldadura, va a producir un aumento de la fragilidad y reducción de la dureza del material.
- Agrietamiento en caliente, conocido en inglés como “Hot cracking”. Es un término usado para identificar las grietas que se forman durante la solidificación de la soldadura. Mecánicamente, consiste en el desgarro de la película líquida debido a las tensiones y deformaciones que surgen de la contracción térmica por la solidificación.

Estas películas líquidas y correspondientes agrietamientos en caliente ocurren a lo largo del borde de grano, pero también puede encontrarse interdentríticamente. El agrietamiento en caliente está normalmente localizado a lo largo del centro de la soldadura en la cara o raíz.

- Formación de eutéctico. La película asociada con el agrietamiento en caliente está típicamente relacionada con la formación de eutéctico de baja temperatura de fusión. Cuando hay una gran diferencia entre el liquidus de una aleación y su punto de fusión eutéctico más bajo, se tiene un gran rango de solidificación que puede someter a las últimas partes líquidas que queden durante la solidificación a unas mayores tensiones.

Puesto que la solidificación es completada en la base de las dentritas, la capacidad para alimentar la contracción con el líquido interdentrítico puede llegar a ser crítico.

Este fenómeno puede darse en la zona adyacente entre el metal base y el metal de soldadura. Además, la zona eutéctica es una zona débil que con un posterior tratamiento térmico puede llegar a licuar la zona y producir una fisura.

Para facilitar la comprensión de lo explicado anteriormente se coge el diagrama de fase del aluminio-silicio (Figura 23). El material de aporte elegido (4043) tiene una cantidad en peso de Silicio de en torno al 6% por lo que se tiene un rango de temperatura de coexistencia entre las fases $\alpha + L$ durante la solidificación del cordón, lo cual como hemos hablado anteriormente podría suponer grietas que dieran lugar a fallos de la unión soldada.

Si utilizásemos un material de aporte con un porcentaje en peso de Silicio del aproximadamente el 12% los fallos debido a este proceso podrían evitarse ya que no habría coexistencia entre las fases líquidas y sólidas.

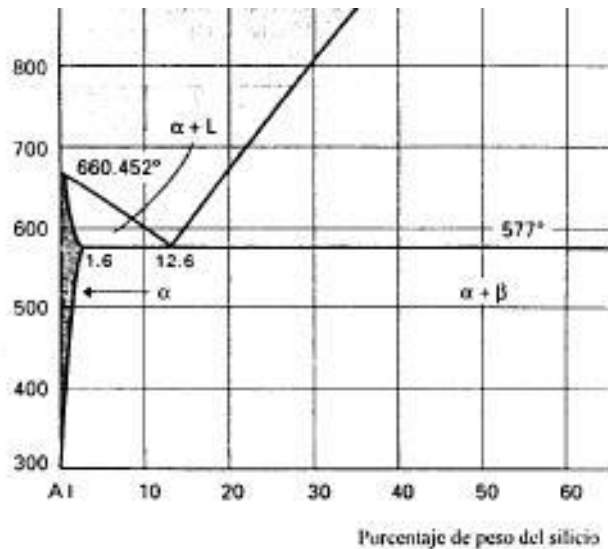


Figura 23. Diagrama de fase Aluminio-Silicio.

Finalmente, con los medios disponibles se realiza un análisis de tamaño de grano en la zona afectada de aquellas casuísticas que presentan un fallo extremadamente frágil.

Además, en el anexo 3, se muestran metalografías realizadas de todos los casos propuestos para 1 mm de espesor.

Para cada uno de los casos se obtendrá:

- Una imagen con aumento 1X, en la que se pueda ver: cordón, Z.A.T y material base.
- Una imagen con aumento de 200X de cada una de las 3 zonas indicadas en el anterior punto.
- Una imagen con aumento de 500X de cada una de las 3 zonas indicadas.

Para la realización de estas metalografías ha sido necesario la preparación de las muestras siguiendo los siguientes pasos para su realización definidos por la norma ASTM E3:

1° Corte de las probetas extraídas de los cupones realizados para cada una de las casuísticas, para obtener un tamaño de muestra adecuado. Consistirá en un corte previo en cizalla y luego un corte definitivo con un equipo de mayor precisión.

2° Se deposita el material en un vaso encapsulado al que se le hecha una mezcla compuesta por unos productos tales que a los 10 minutos podrán ser demoldado.

3° Esmerillado y pulido del material. En este paso conseguiremos una calidad superficial de la muestra a analizar apta para hacer el ensayo metalográfico.

4° Ataque químico. En este caso se ha optado por un ataque con KROLL que nos permitirá la visualización del grano para su conteo.

4.2.1. Estudio del tamaño de grano.

Aquí se muestra el análisis del tamaño de grano de aquellas casuísticas que han mostrado un comportamiento extremadamente frágil para algún número de reparación.

La zona de interés del tamaño de grano será la zona de unión entre material base y metal de soldadura.

Para saber el tamaño de grano se sigue la norma ASTM E112. Esta norma muestra 3 procedimientos posibles de análisis:

- Procedimiento de comparación: comparación de la estructura de grano con una serie de imágenes graduadas dadas.
- Procedimiento planimétrico. Conteo del n° de granos confinados dentro de un área determinada.
- Procedimiento de intercepción. Conteo de los granos interceptados por una línea de ensayo o el n° de

intersecciones con bordes de grano por geometrías determinadas circulares o lineales.

El procedimiento escogido es el método de Abrams.

El método de Abrams consiste en la realización de 3 circunferencias concéntricas separadas entre ellas una misma distancia. Los 3 perímetros tendrán que sumar un total de 500 mm. Los diámetros serán de 79,58 mm, 53,05 mm y 26,53 mm.

Antes de dibujar las 3 circunferencias sobre el papel impreso es necesario ajustar la imagen para que en su impresión no se vea alterada la escala de la misma y se pueda usar correctamente la magnificación.

Para la elección de la magnificación adecuada se tomará una magnificación tal se tenga un total de intercepciones que oscilen entre 40 y 100 siendo la medición más precisa siempre que el conteo se acerque o los valores mayores.

La norma define una regla de conteo en la que se diferencian dos conceptos fundamentales para la realización de los métodos de intercepción:

- Intercepción: segmento de la línea de ensayo que pasa por un grano.
- Intercección: punto donde la línea de ensayo es cortada por un borde de grano.

A partir de la Ecuación 1 se obtiene el tamaño de grano ASTM G.

$$G = (6,643856 \cdot \log_{10} \overline{P}_L) - 3,288 \quad (1)$$

y

\overline{P}_L se calcula con el uso de la Ecuación 2:

$$\overline{P}_L = \frac{P_i}{\frac{L}{M}} \quad (2)$$

Dónde:

P_i es el número de intercepciones medidas en el perímetro de las 3 circunferencias.

L es la longitud total de los 3 perímetros (500 mm).

M es la magnificación usada.

Los resultados obtenidos tomando una magnificación igual a 100X para los casos señalados son mostrados en la Tabla 17.

Tabla 17. Resultados del método de Abrams para el cálculo de G.

CASOS	Circunf. Peq	Circunf. Med	Circunf. Gr.	Conteo total	PL	G
0 REP. SIN T.T. ADICIONALES	52	93	144	289	57,8	8,42
3 REP. SIN T.T. ADICIONALES	40	78	100	218	43,6	7,60
0 REP. POST. MADURACIÓN	43	81	120	244	48,8	7,93
1 REP. POST. MADURACIÓN	43	85	115	243	48,6	7,92
3 REP. POST. MADURACIÓN	40	67	103	210	42	7,50
2 REP. POST. MADURACIÓN	40	81	112	233	46,6	7,80
0 REP. POST. SOLUBILIZACIÓN + MAD.	45	82	136	263	52,6	8,15
1 REP. POST SOLUBILIZACIÓN + MAD.	51	92	112	255	51	8,06
2 REP. POST. SOLUBILIZACIÓN + MAD.	42	78	124	244	48,8	7,93
3 REP. POST. SOLUBILIZACIÓN + MAD.	37	72	97	206	41,2	7,44

Antes de comenzar con el análisis de los resultados obtenidos es importante explicar el significado del número G (ASTM Grain size number). Este número está relacionado con el número de granos que se pueden contar en una magnificación M por la relación: $M = 2^{G-1}$. Por lo tanto, el número G va a crecer cuando el tamaño de grano se reduce.

Ahora se muestran los valores de “G” gráficamente para facilitar el análisis en la Figura 24.

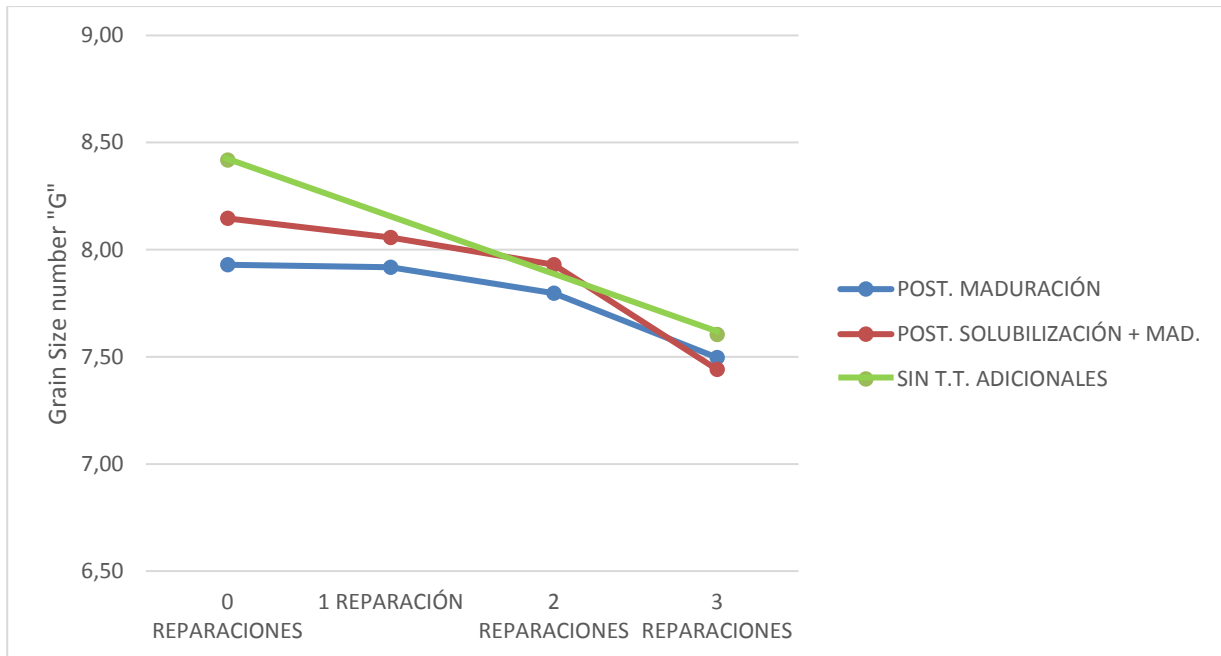


Figura 24. ASTM Grain size number para los casos propuestos en función del número de reparaciones.

En primer lugar, a partir de la Figura 24 se puede destacar el aumento de grano generalizado debido al aumento del número de reparaciones lo cual puede suponer mayor probabilidad de rotura en la zona ya que el aumento de grano por sí sólo va a producir un aumento de la fragilidad y reducción de dureza.

Por otro lado, destacar que sin reparaciones el grano es más pequeño para el caso en el que no se aplica ningún tratamiento térmico a continuación de la soldadura y el grano más grande se tiene cuando se aplica una posterior maduración. El hecho de que cuando se aplica sólo maduración se tiene un grano medio mayor que cuando se hace la maduración con una previa solubilización puede ser por el hecho de que cuando se madura sin una previa solubilización, la parte del material estudiada está en la parte adyacente entre metal base y metal de soldadura, es decir, en la Z.A.T por lo que esta parte se podría decir que tiene un estado térmico desconocido entonces la maduración no te lleva el material afectado térmicamente a un estado T6 sino a un estado “X” desconocido que podría suponer un crecimiento más descontrolado del grano que en el caso en el que solubilizamos y dejamos todo el material en un estado homogeneizado con cristales equiaxiales y luego maduramos artificialmente consiguiendo un aumento del tamaño de grano más controlado.

En el anexo II se muestran ejemplos del método de conteo por intercección en las distintas casuísticas tratadas.

5 CONCLUSIONES Y POSIBLE CONTINUACIÓN DEL ESTUDIO

5.1. Conclusiones.

En este apartado se va a proceder a la realización de conclusiones obtenidas a partir de los resultados obtenidos anteriormente.

En primer lugar, sobre la **carga de rotura** de las distintas casuísticas se pueden resumir las conclusiones en los siguientes puntos:

- El deterioro de esta propiedad con el número de reparaciones es más elevado para el caso en el que la unión soldada es sometida a un proceso de maduración artificial posterior a la ejecución del soldeo. Se produce un deterioro en % respecto a la soldadura óptima impuesta desde un 111% con ninguna reparación hasta un 59 % con 3 reparaciones. Además, destacar que a partir de la primera reparación ya empiezan a darse fallos extremadamente frágiles en el inicio de la Z.A.T.
- Para aquellos casos en los que se suelda en T6, es decir el material base pasa por un tratamiento de solubilización más maduración o maduración previo a la realización de soldadura, no presentan fallo extremadamente frágil y sus valores de cargas de roturas se mantienen un valor mínimo de un 80 % respecto al ideal, valor que se puede ver a partir de la 1º reparación.
- En cuanto a los casos sin tratamientos térmicos adicionales se ve una reducción lineal de la carga de rotura hasta llegar a un 79.7 % con 3 reparaciones respecto al caso sin reparaciones. Destacar el fallo con apenas deformación con 3 reparaciones. El caso en el que se aplica un posterior alivio de tensiones tiene un comportamiento similar a este último, aunque este tratamiento reduce la caída de las propiedades mecánicas con las reparaciones.
- En el caso que se aplica un tratamiento completo de endurecimiento por precipitación (solubilizamos y luego maduramos), se observa un comportamiento algo impredecible con el aumento del nº de reparaciones, aunque es reseñable que no se obtiene un valor menor al tomado como referencia en ningún caso.

Sobre los ensayos de tracción realizados en las probetas de espesor igual a 3,2 mm se puede observar como la rotura es más dúctil que para los mismos casos de menor espesor. Se tienen unos límites elásticos por norma general menores a los que se den con los espesores de 1 mm y sobre todo y más importante en estos espesores para los casos más restrictivos (3 reparaciones) no se han dado fallos de carácter frágil lo cual es un aspecto a tener en cuenta. Es más fácil la detección de un fallo si antes del mismo se produce una deformación suficiente tal que pueda ser detectada. Destacar en la comparación realiza en % para los casos de 3.2 mm de espesor, que aunque son las casuísticas más restrictivas con 3 reparaciones, el deterioro de propiedades es considerablemente menor al que se tiene para los casos semejantes y espesor de chapa de 1 mm.

En cuanto al **criterio de aceptación** establecido se puede considerar que tenemos resultados consistentes con la norma aeronáutica aplicable (apartado 1.5) ya que para las soldaduras con Clase de seguridad I (soldaduras con un mayor nivel de criticidad) es permitido sólo una reparación y en nuestros casos practicamente todos entran dentro del nivel de acetación. El mejor caso desde el punto de vista de resistencia a la tracción será el caso con posterior solubilización más maduración que presenta los valores medios de carga de rorura más elevados tras las sucesivas reparaciones.

Es reseñable destacar que el caso con 1 reparación y anterior solubilización más maduración se ve muy influenciado por la geometría inicial de las placas al ser colocadas para el soldeo. A partir de este tratamiento la placa queda muy deformada para espesores de 1 mm por lo que mejorando este efecto seguramente este caso entraría dentro del criterio establecido.

Atendiendo a los resultados obtenidos con los ensayos de dureza se obtienen las siguientes conclusiones:

- Se confirma la hipótesis de que por norma general la zona afectada térmicamente pierde dureza a medida que es sometida a procesos de reparación, aunque al ser un proceso manual dependerá del proceso de soldeo que la zona sea más o menos afectada.
- Se aprecia una constante en la zona de rotura, situada a 7-9 mm desde el centro del cordón para espesores de 1 mm y de 12-14 mm para aquellas de espesor 3,2 mm a excepción del fallo extremadamente frágil que se produce la rotura en la zona de unión entre metal base y metal de soldadura.
- La zona afectada térmicamente mantiene su extensión en torno a los 12-14 mm desde el centro del cordón para el caso de 1 mm.
- La línea de dureza reduce sus valores máximos y mínimos (más cercano al caso ideal de una línea horizontal) para aquellos casos con tratamientos térmicos de endurecimiento posteriores a la realización de la soldadura aunque esto afecte a la forma de fallo de la unión. Se determina que el caso más ideal será el que se somete a un tratamiento de solubilización más maduración posterior a la realización del cordón.

Por último, con ayuda de las metalografías y el análisis del tamaño de grano se obtienen las siguientes conclusiones:

- El tamaño de grano aumenta en la zona adyacente entre metal base y de soldadura con el aumento del número de reparaciones lo que podría ser uno de los factores que supone la rotura frágil en las casuísticas bajo estudio.
- Aunque se da el crecimiento del tamaño de grano en la zona de rotura extremadamente frágil habría que contemplar también el posible fallo frágil debido a las otras 2 posibilidades existentes: agrietamiento en caliente y formación de eutéctico.
- La ejecución de tratamientos térmicos de endurecimiento produce el crecimiento de grano en la zona estudiada.

5.2. Posible continuación del estudio

A partir de los resultados obtenidos durante el estudio realizado se proponen varias alternativas para continuar con la investigación del tema tratado:

1. Análisis del uso de un material de aporte diferente compatible con la aleación tratada y con un porcentaje de Silicio cercano al 12 % con el objetivo de reducir la convivencia de estados sólidos y líquidos que puede dar lugar una reducción de las defectologías de la unión.
2. Estudio metalográfico más exhaustivo con el fin de determinar con más certeza las razones de los fallos extremadamente frágiles y buscar medidas para reducirlos.
3. Análisis del efecto de la variación de los parámetros de soldeo en las propiedades mecánicas de la unión.
4. Análisis de forma cuantitativa del efecto de la porosidad producida en el soldeo TIG del aluminio en las propiedades mecánicas de la unión.
5. Estudiar el efecto de las reparaciones en otras tipologías de uniones (ángulo, solape...)
6. Comportamiento a Fatiga de la unión soldada.

6 REFERENCIAS

- [1] George E. Totten, D.Scott MacKenzie, (2003). *Handbook of Aluminum. Volume 1. Physical Metallurgy and Processes*. New York. Marcel Dekker, Inc.
- [2] Enciclopedia libre. Recuperado de <https://es.wikipedia.org>
- [3] Documentación Airgrup.
- [4] E. Martínez, R. González, V.Climent. (2018). *Efecto del aporte térmico en las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio*. Recuperado de Interempresas.net
- [5] ASM Aerospace Specification Metals Inc. Aluminum 6061-T4. Recuperado de <http://asm.matweb.com/>
- [6] *Metalografía Protocolo. Curso de Materiales*. (2011) Facultad de Ingeniería Industrial. Laboratorio de producción. Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”.
- [7] Alcupla S.A. *Composición Química de las aleaciones del aluminio*. Valencia.
- [8] Lincoln Electric. Departamento de Formación. *Soldeo de aluminio y sus aleaciones*.
- [9] M. Roldán (2007) Trabajo Fin de Carrera. *Técnicas de Obtención de Grano Metalográfico en el Rango Milimétrico y Centimétrico Mediante Diversos Tratamiento Térmicos y Mecánicos*.
- [10] ASM Handbook, Volume 4. (1991) *Heat treating of Aluminum Alloys*.
- [11] K. Kulkarni (2015) *Heat Treatments of Aluminum Alloys*. Department of Materials Science and Engineering. Indian Institute of Technology Kanpur.
- [12] G. Mrowka-Nowotnik, J. Sieniawski. (2005) *Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys*. University of Poland.
- [13] R.P. Garrett, J.Lin, T.A. Dean (2004) *An investigation of the effects of solution heat treatment on mechanical properties for AA 6xxx alloys: experimentation and modelling*. University of Birmingham.

ANEXO I. IMÁGENES DE PROBETAS ENSAYADAS A TRACCIÓN

En este anexo se van a mostrar las imágenes de las probetas ensayadas para los distintos casos de estudio propuestos. Primero se muestran las probetas de espesor igual a 1 mm.

Soldadura sin ningún tratamiento térmico adicional ni reparaciones



Soldadura sin tratamientos térmicos adicionales con 1 reparación



Soldadura sin tratamientos térmicos adicionales con 2 reparaciones



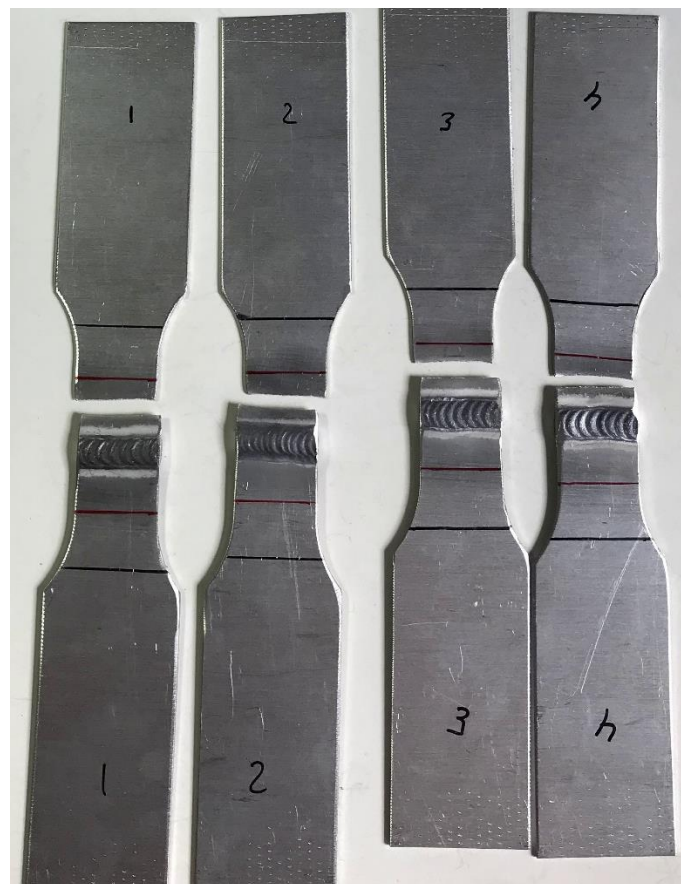
Soldadura sin tratamientos térmicos adicionales con 3 reparaciones



Soldadura con posterior Alivio de tensiones sin ninguna reparación



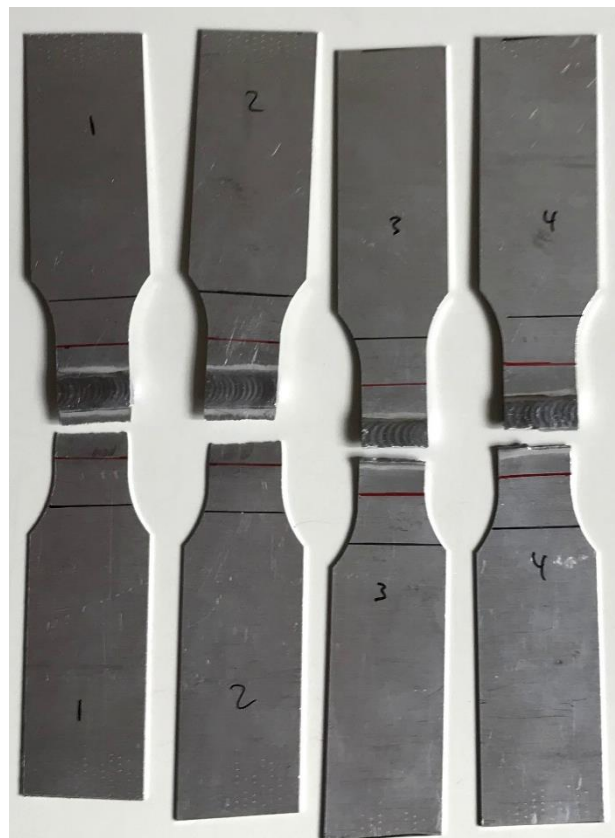
Soldadura con posterior Alivio de tensiones con 1 reparación



Soldadura con posterior Alivio de tensiones con 2 reparaciones



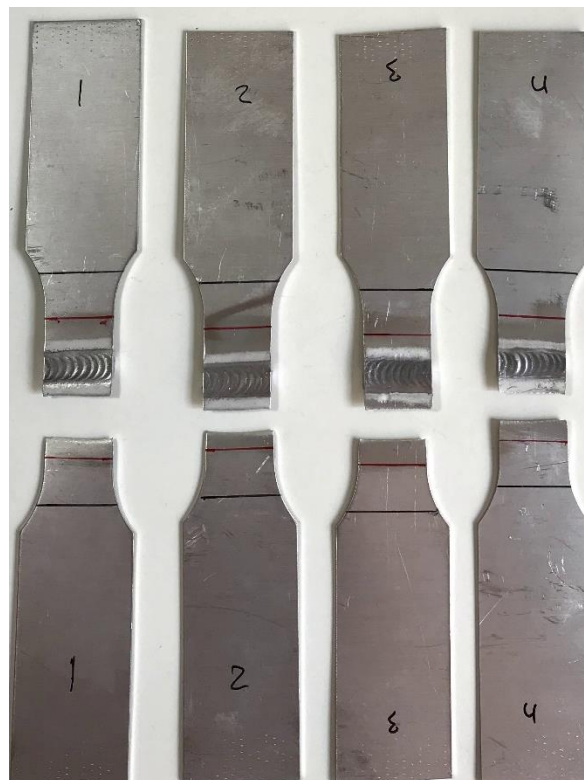
Soldadura con posterior Alivio de tensiones con 3 reparaciones



Soldadura con previa solubilización + maduración sin ninguna reparación



Soldadura con previa solubilización + maduración con 1 reparación



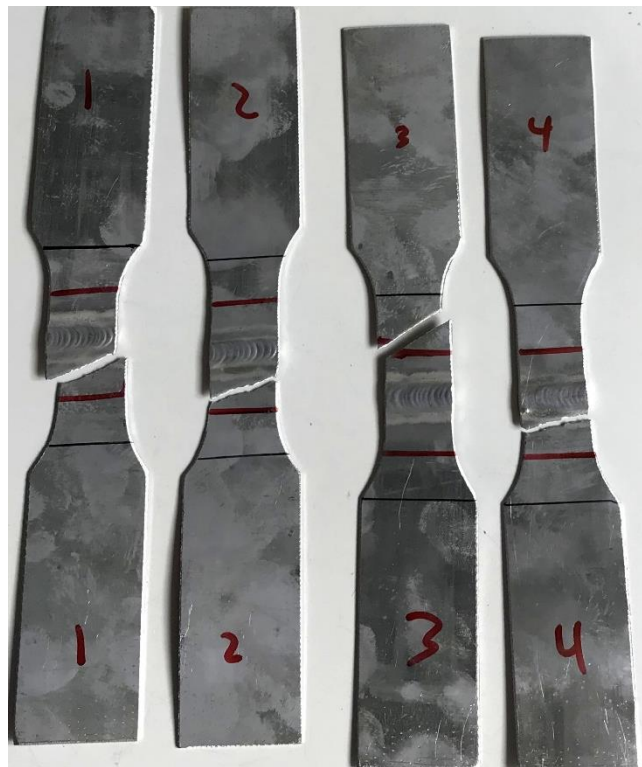
Soldadura con previa solubilización + maduración con 2 reparaciones



Soldadura con previa solubilización + maduración con 3 reparaciones



Soldadura con posterior solubilización + maduración sin ninguna reparación



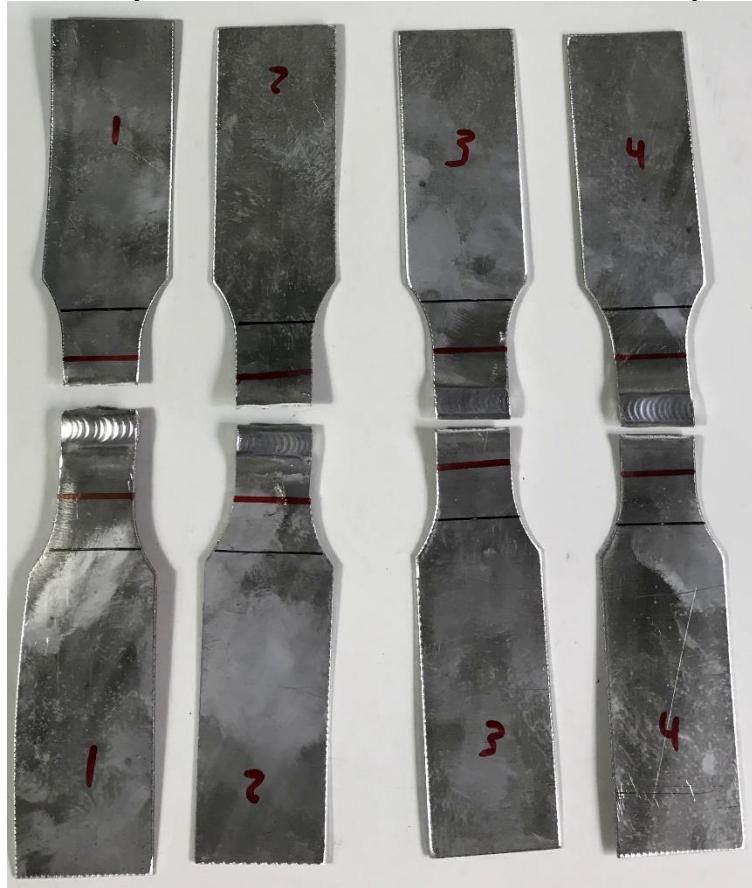
Soldadura con posterior solubilización + maduración con 1 reparación



Soldadura con posterior solubilización + maduración con 2 reparaciones



Soldadura con posterior solubilización + maduración con 3 reparaciones



Soldadura con posterior maduración sin ninguna reparación



Soldadura con posterior maduración con 1 reparación



Soldadura con posterior maduración con 2 reparaciones



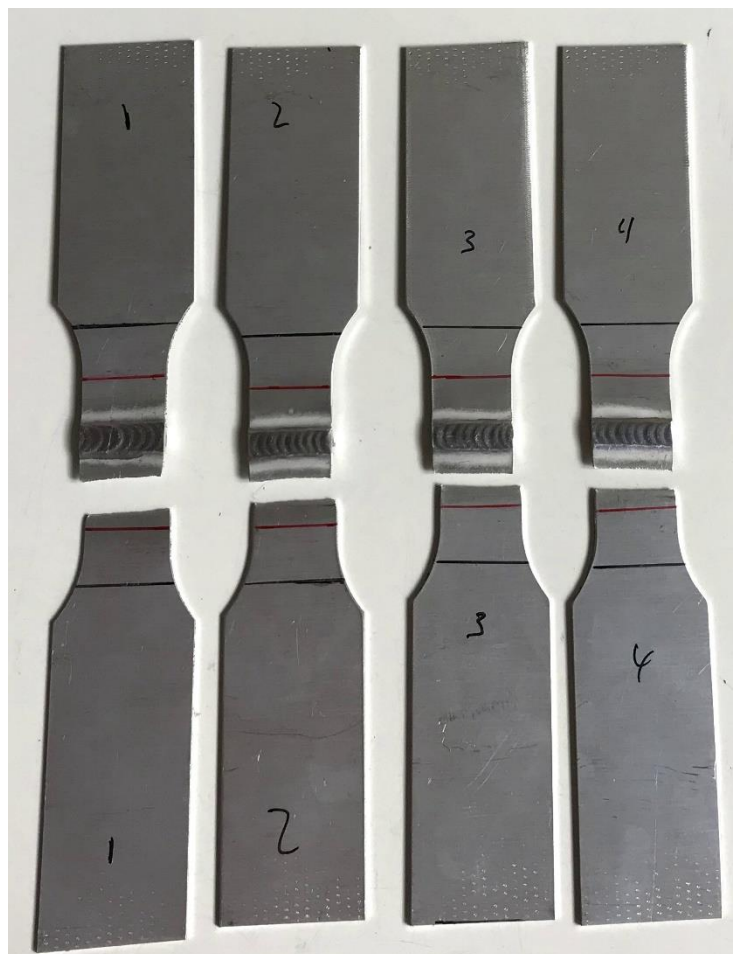
Soldadura con posterior maduración con 3 reparaciones



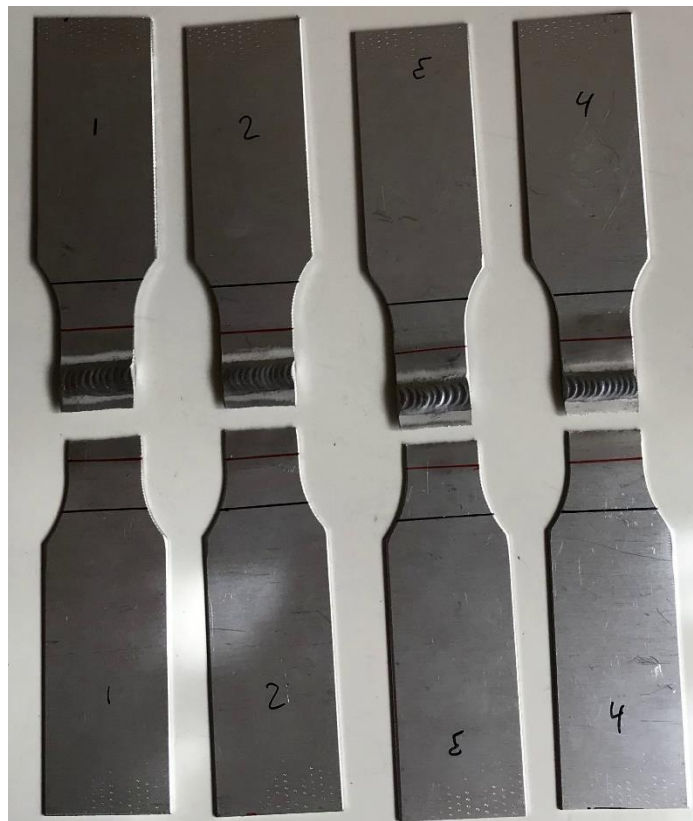
Soldadura con previa maduración sin ninguna reparación



Soldadura con previa maduración con 1 reparación



Soldadura con previa maduración con 2 reparaciones



Soldadura con previa maduración con 3 reparaciones



Ahora se muestran los casos con chapas de espesor igual a 3,2 mm.

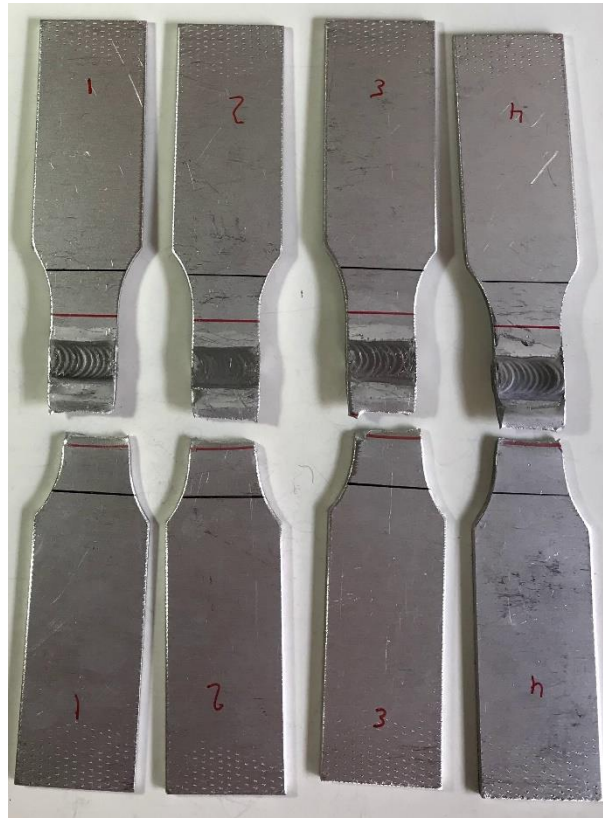
Soldadura sin ningún tratamiento térmico adicional ni reparaciones



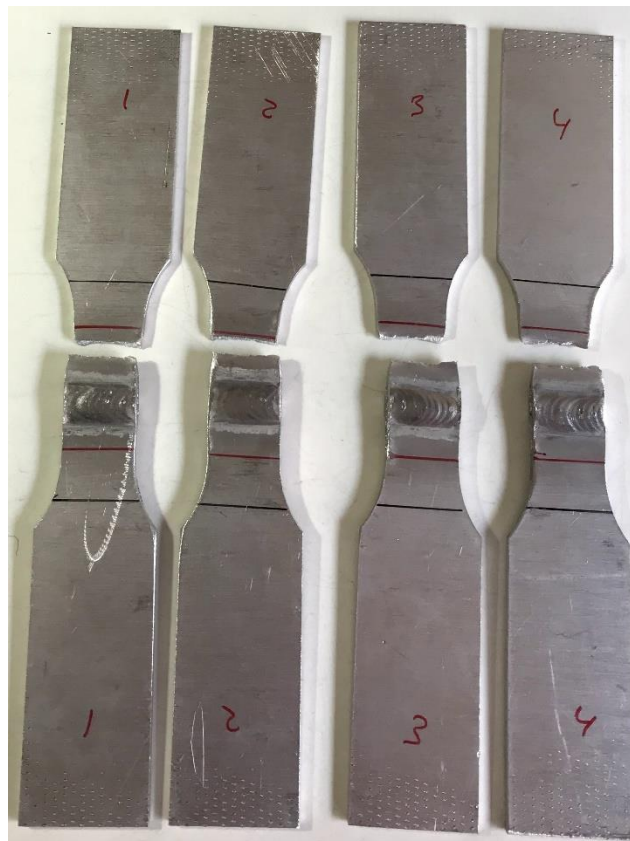
Soldadura sin ningún tratamiento térmico adicional con 3 reparaciones



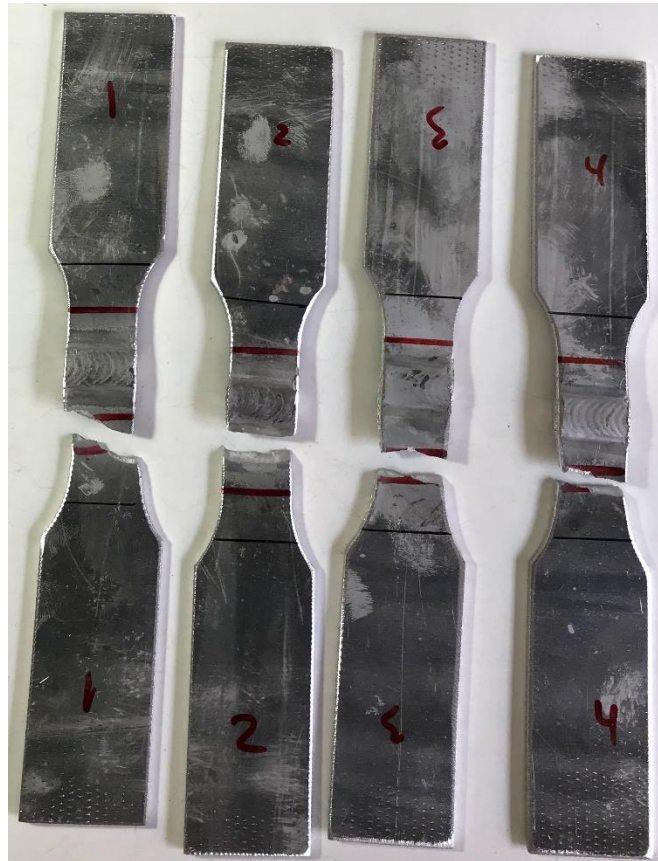
Soldadura con posterior Alivio de tensiones con 3 reparaciones



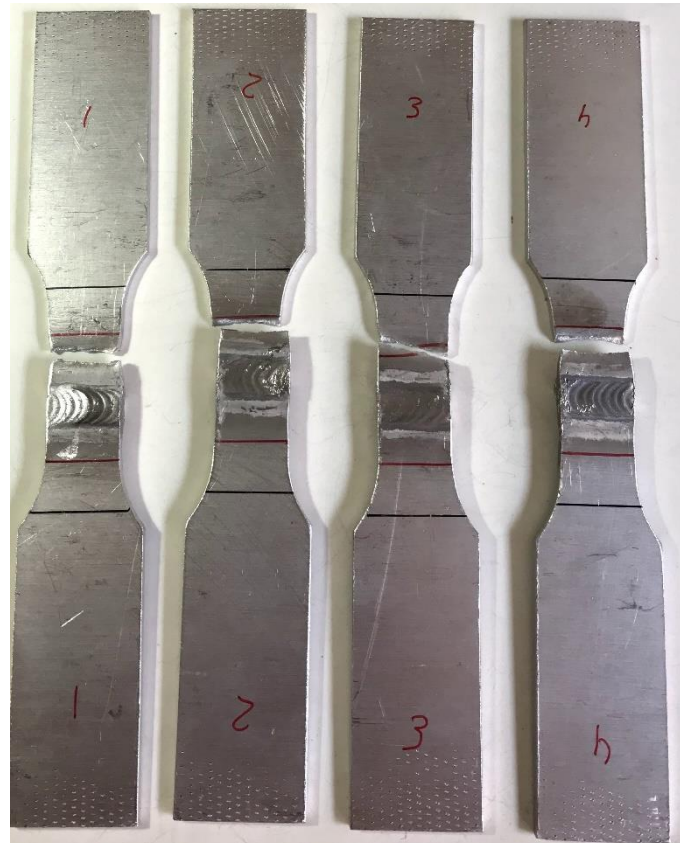
Soldadura con previa solubilización + maduración con 3 reparaciones



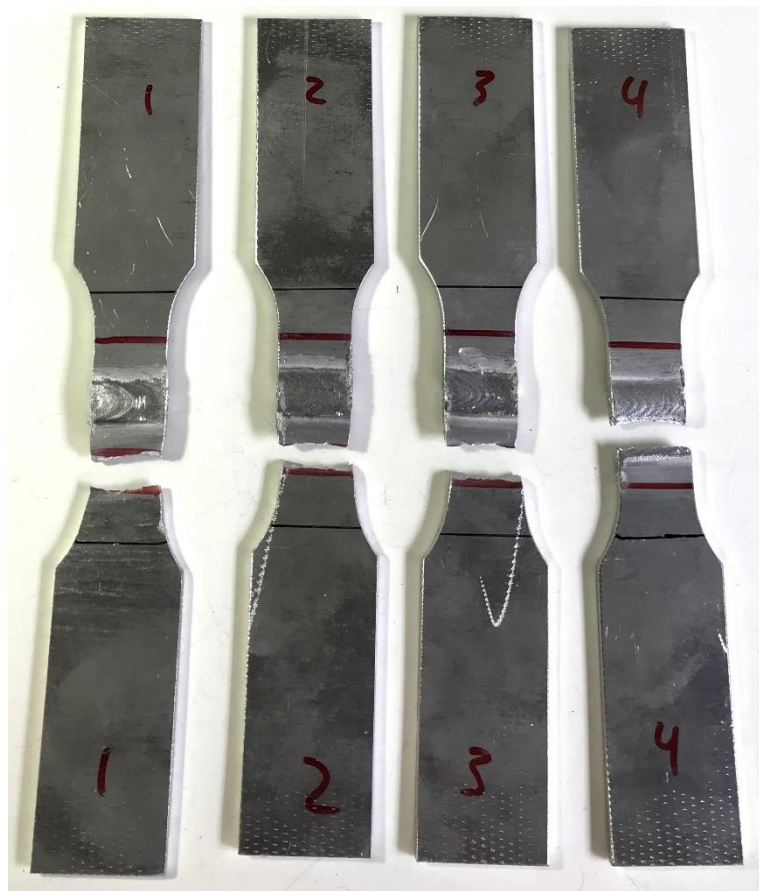
Soldadura con posterior solubilización + maduración con 3 reparaciones



Soldadura con previa maduración con 3 reparaciones



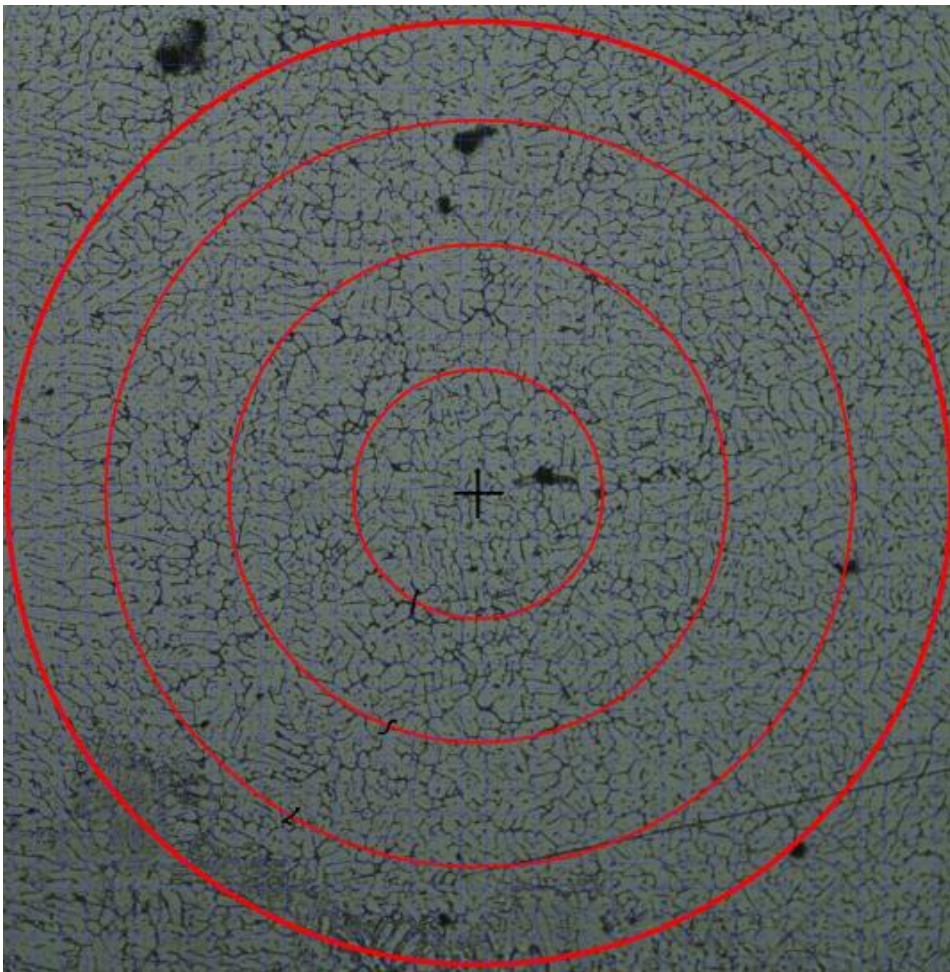
Soldadura con posterior maduración con 3 reparaciones



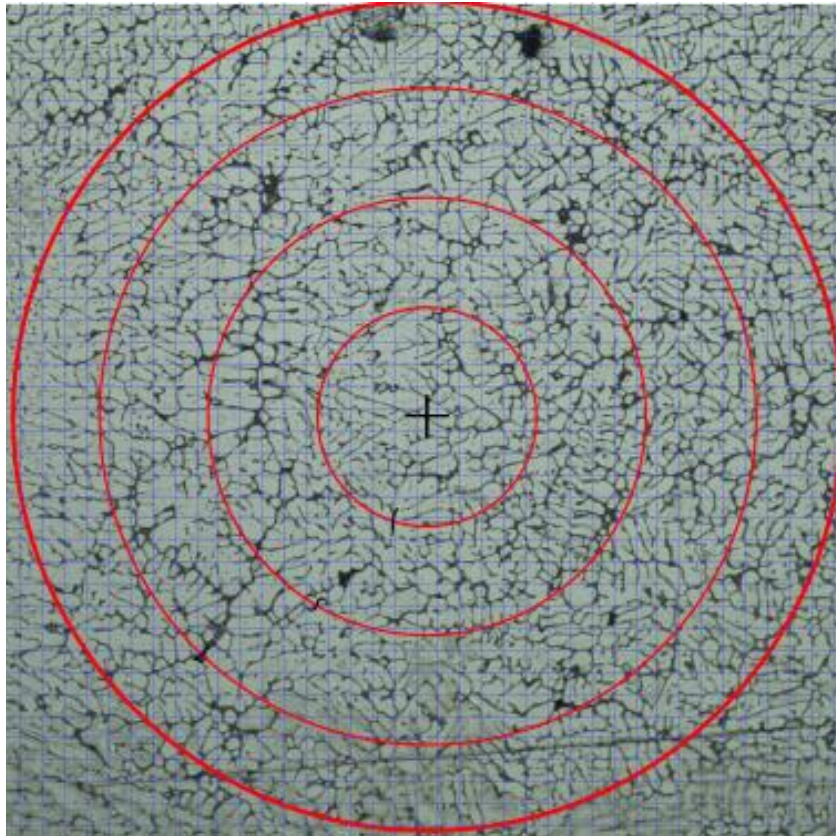
ANEXO II. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ABRAMS

En este anexo se van a mostrar imágenes metalográficas con las cuales se ha procedido al cálculo del tamaño de grano según el método de Abrams.

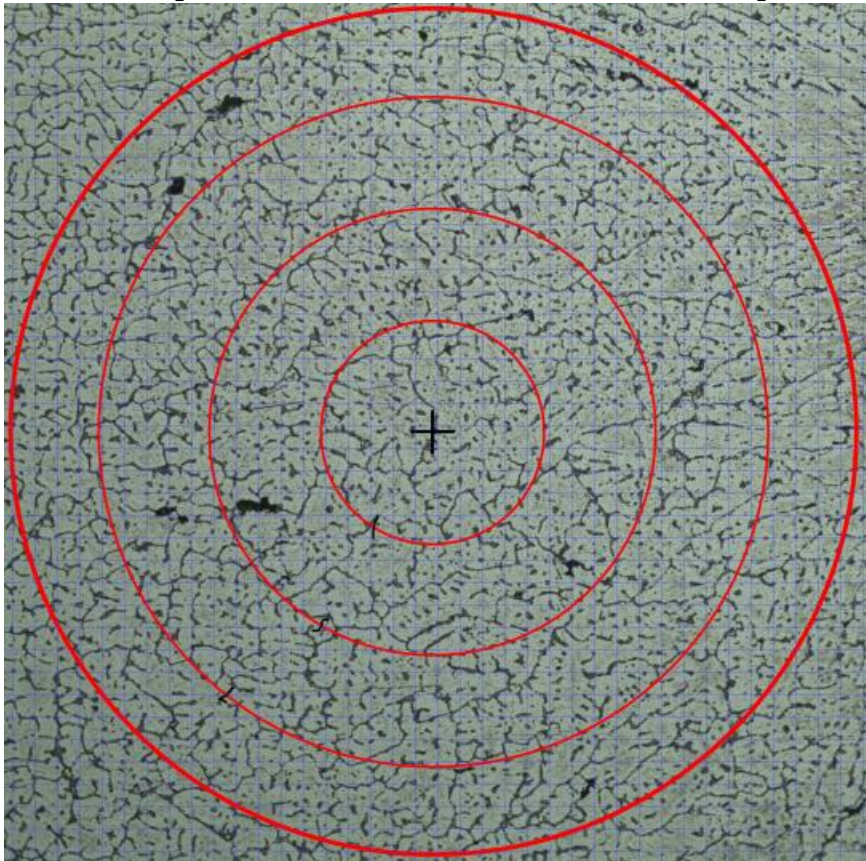
Soldadura sin ningún tratamiento térmico adicional ni reparaciones.100 X



Soldadura con posterior maduración con 3 reparaciones. 100X



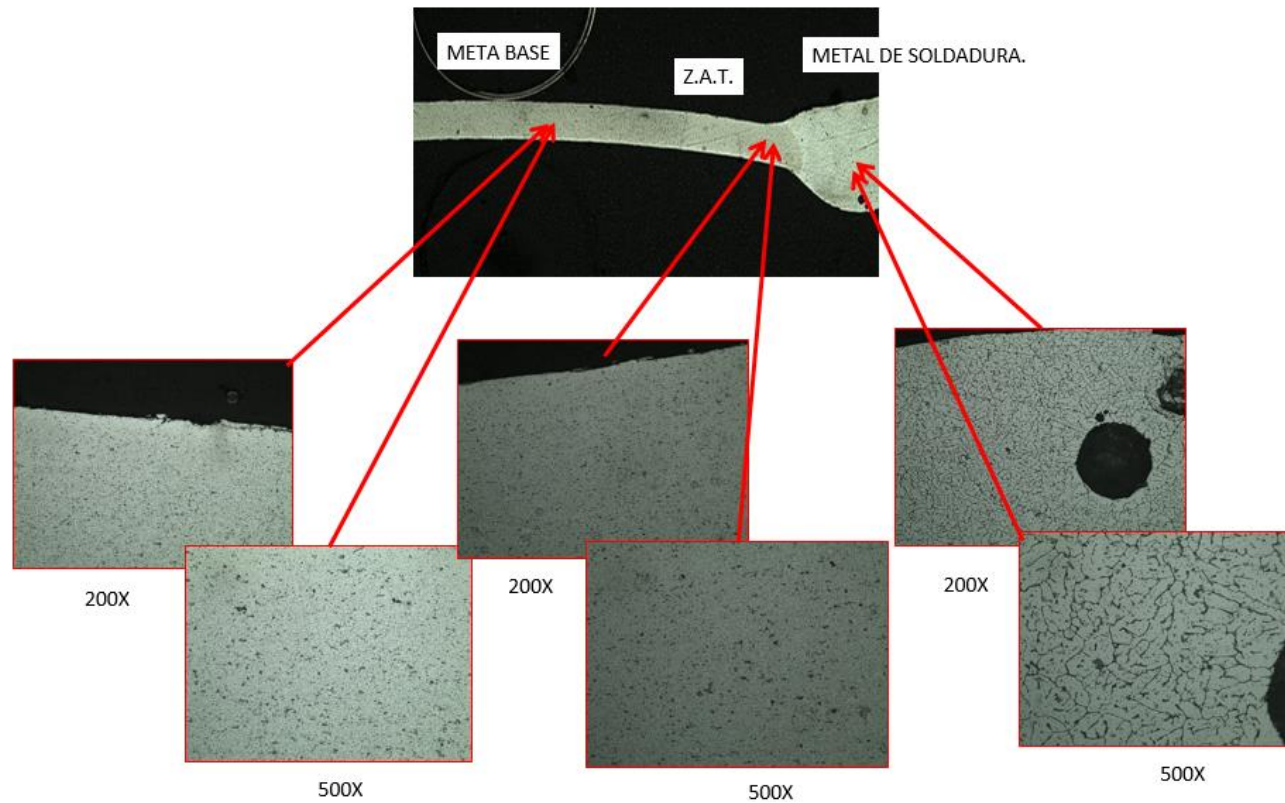
Soldadura con posterior solubilización + maduración con 3 reparaciones



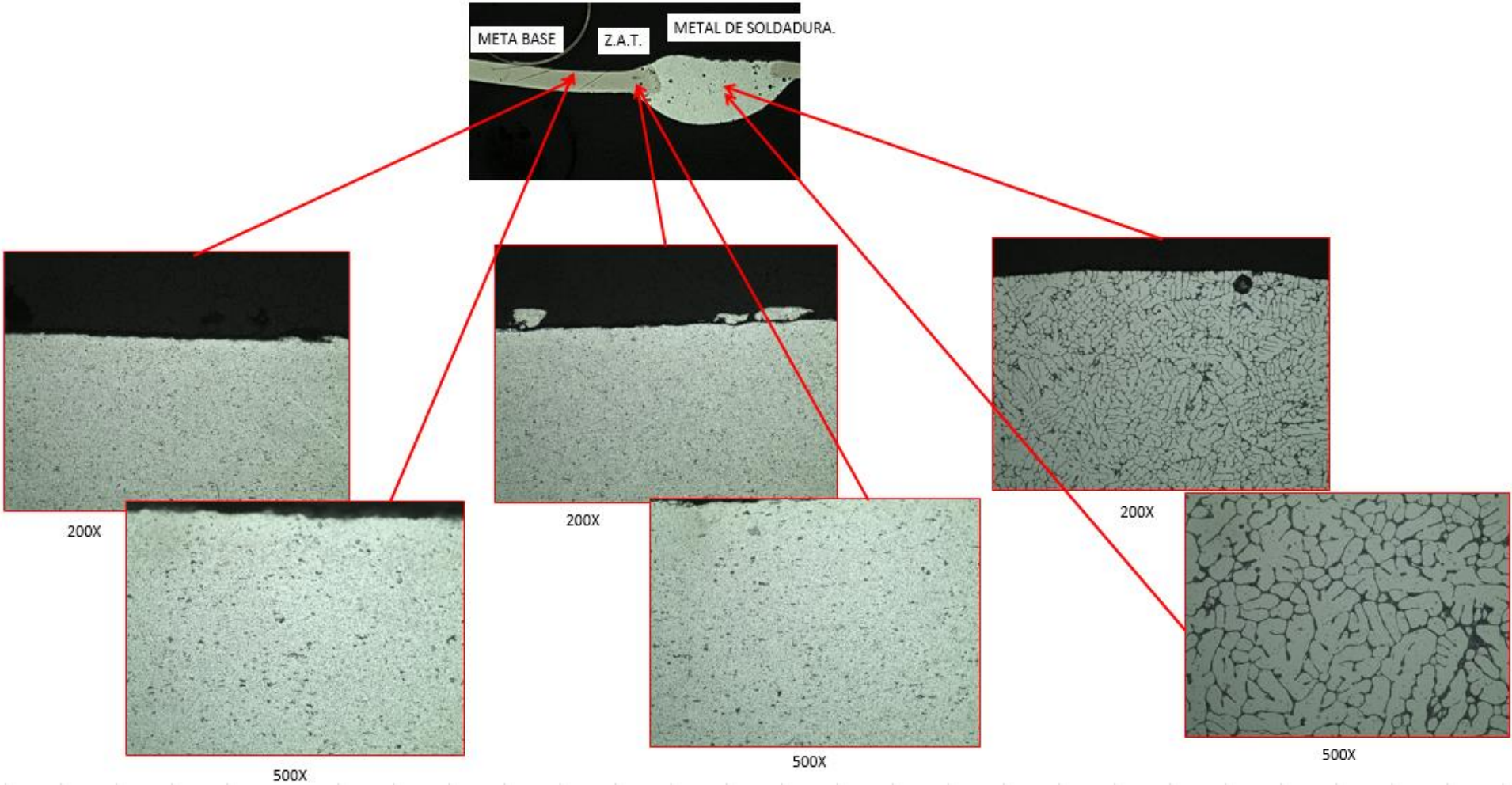
ANEXO III. METALOGRAFÍAS

En este Anexo se muestran las metalografías de todas las probetas de espesor 1 mm que se han estudiado.

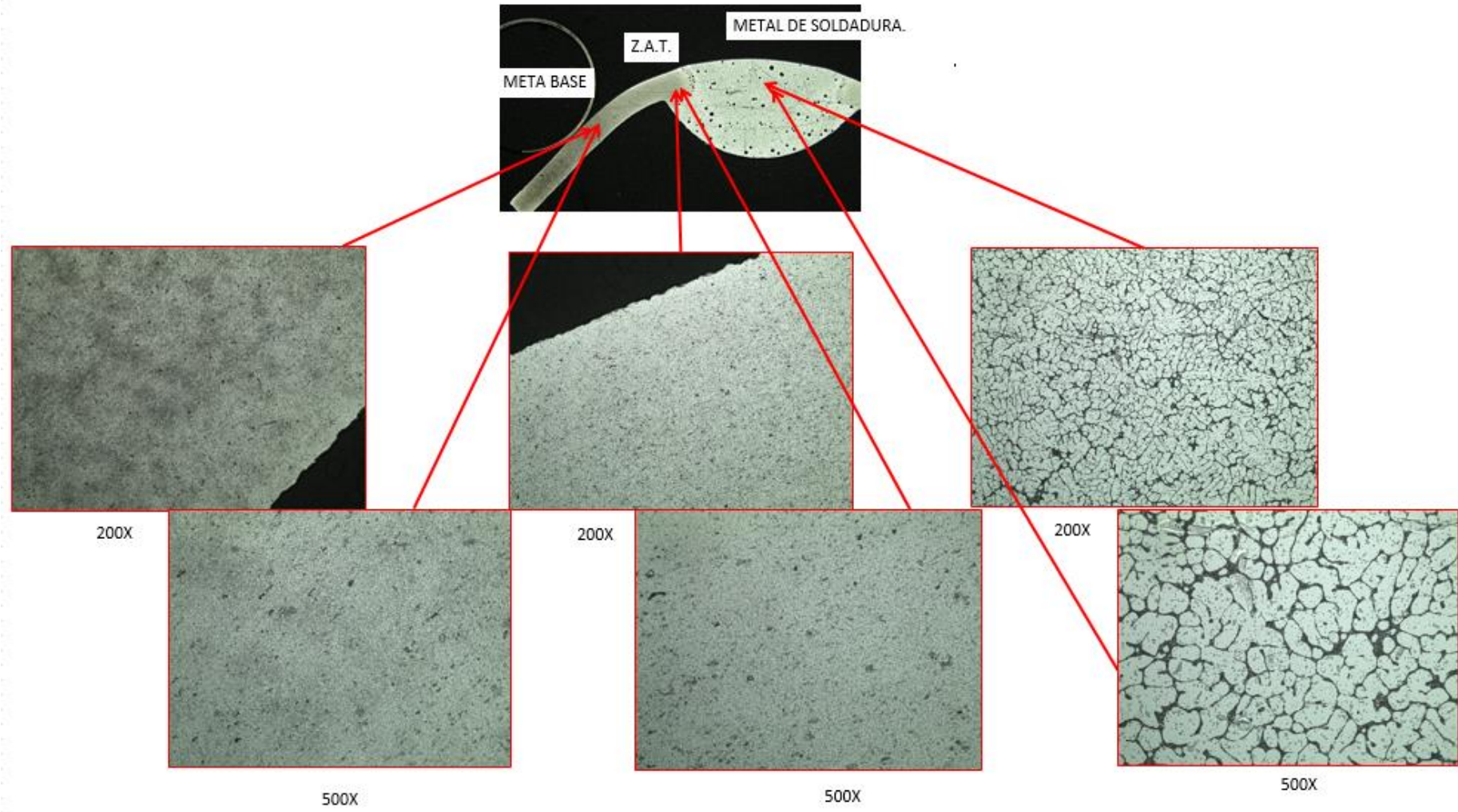
Soldadura sin ningún tratamiento térmico adicional ni reparaciones



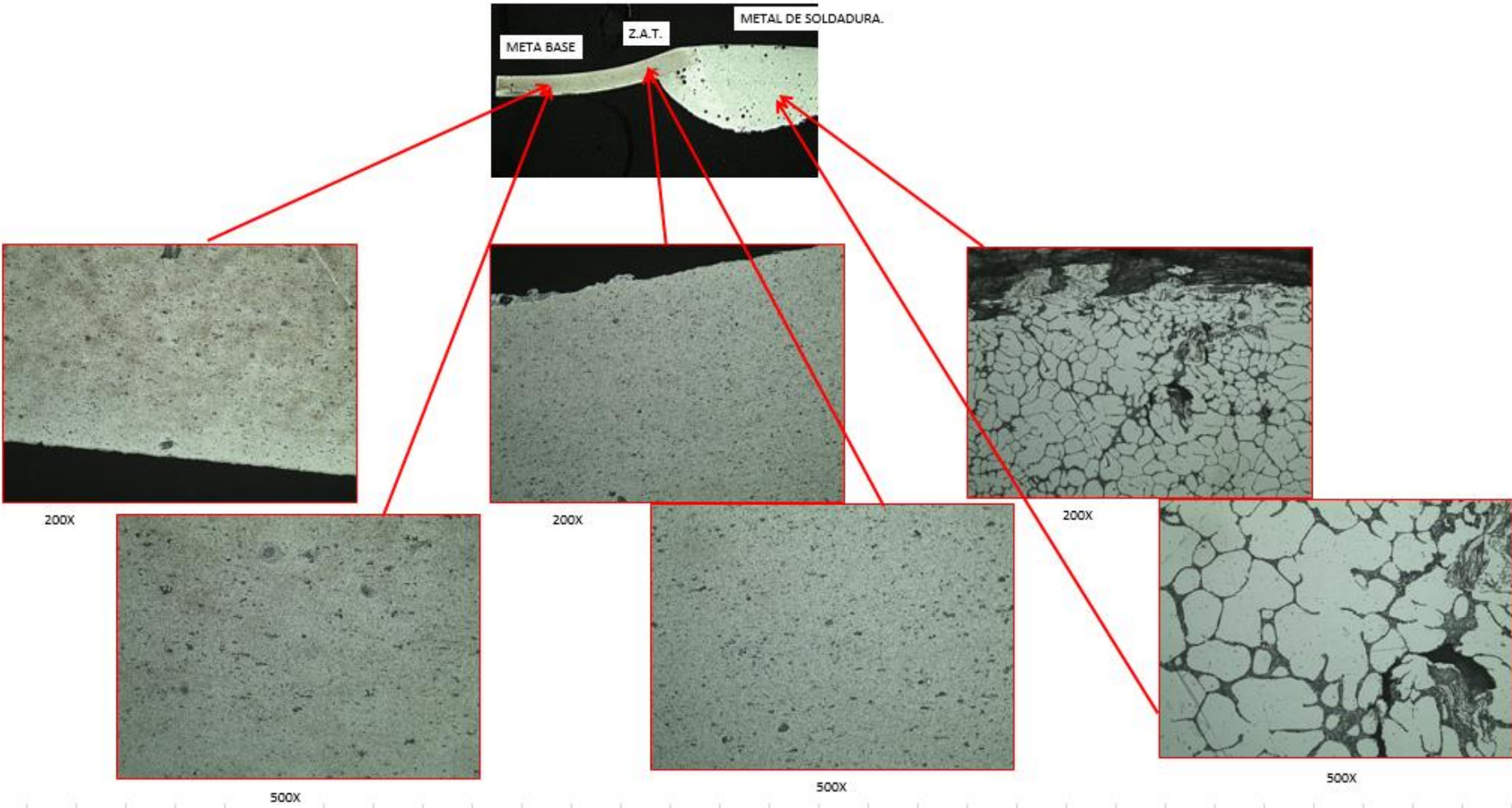
Soldadura sin tratamientos térmicos adicionales con 1 reparación



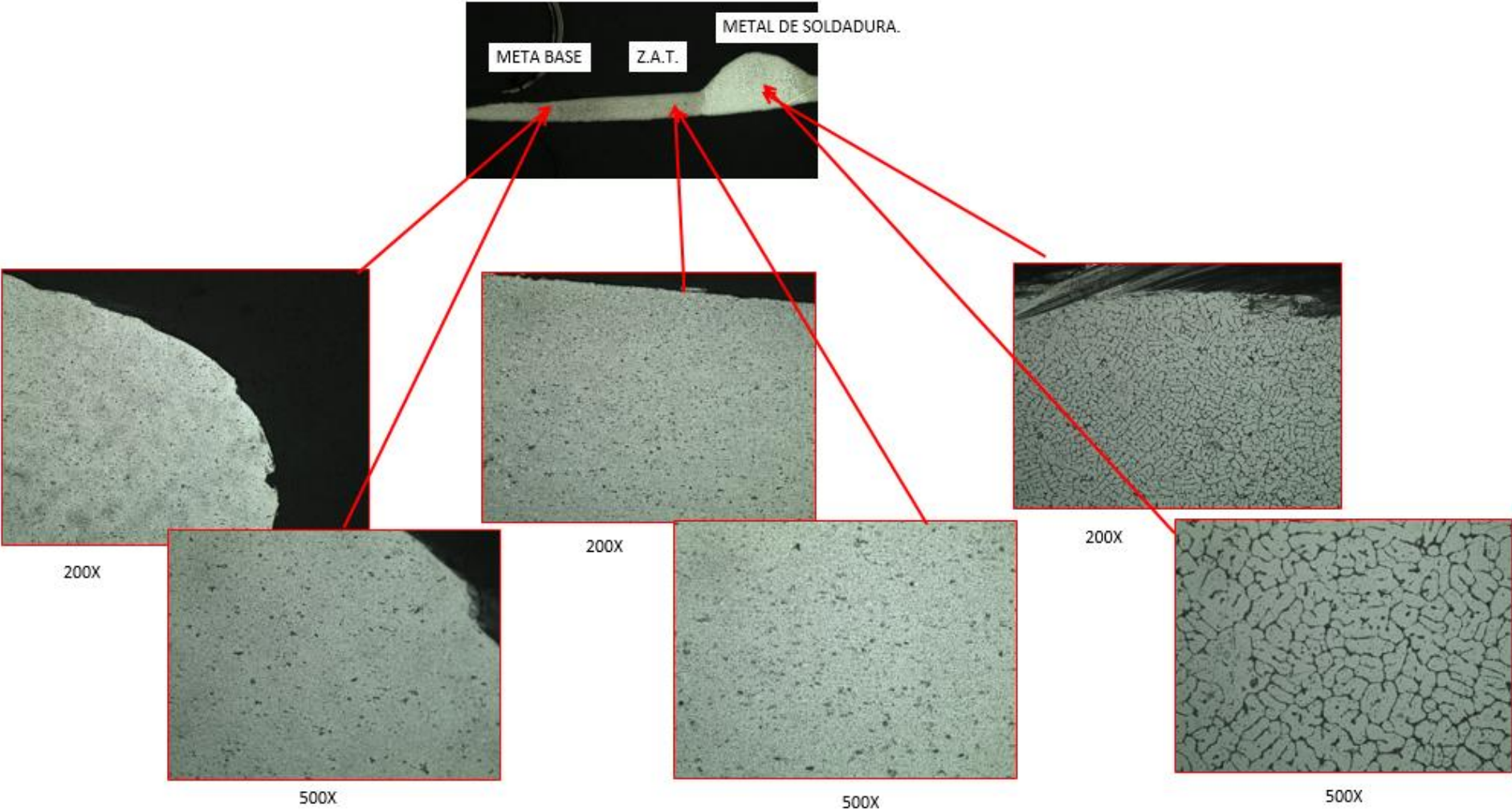
Soldadura sin tratamientos térmicos adicionales con 2 reparaciones



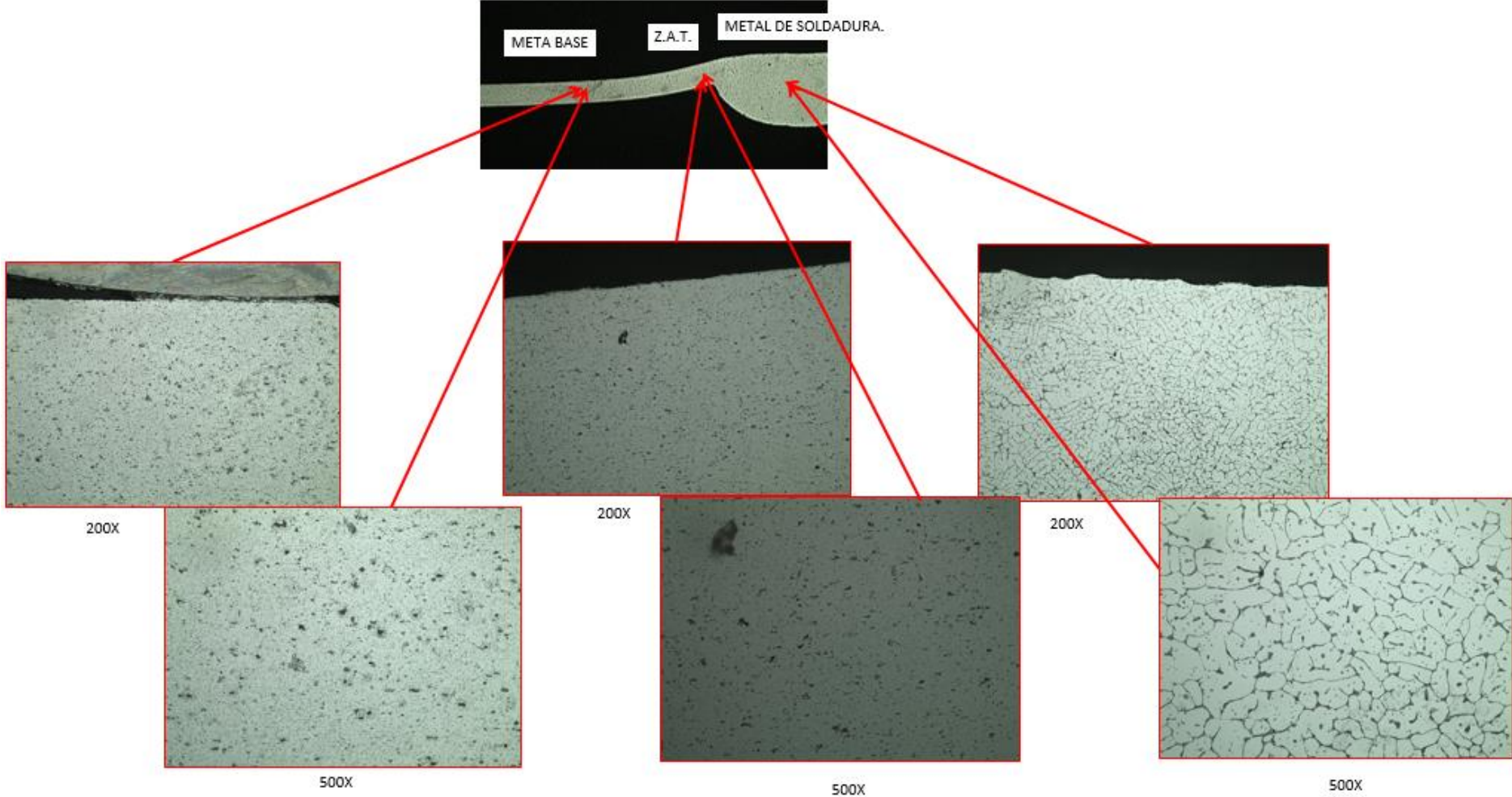
Soldadura sin tratamientos térmicos adicionales con 3 reparaciones



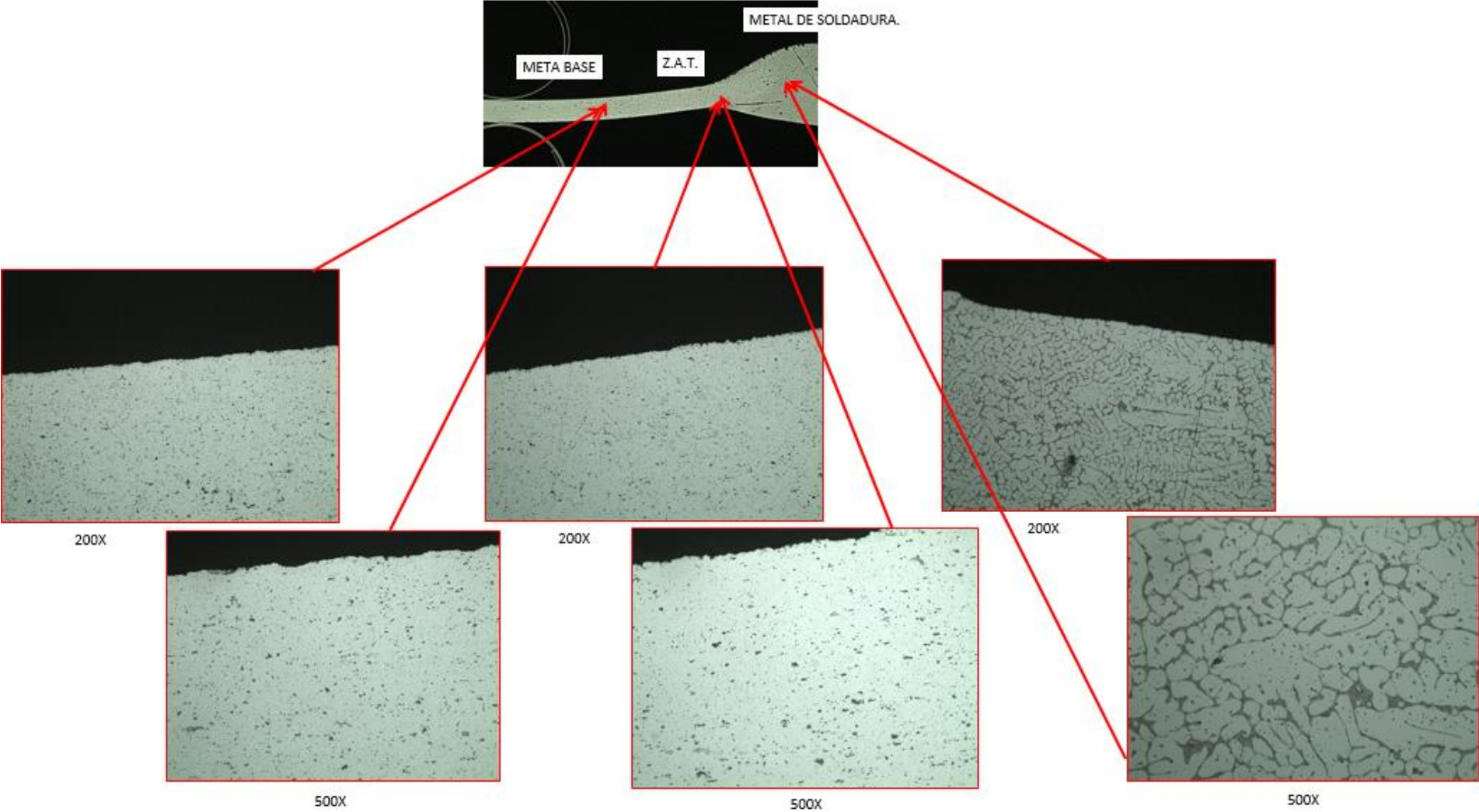
Soldadura con posterior Alivio de tensiones sin ninguna reparación



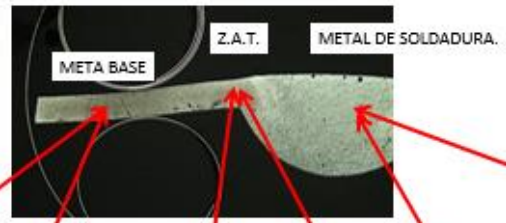
Soldadura con posterior Alivio de tensiones con 1 reparación



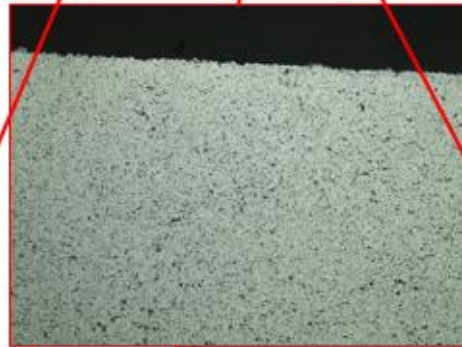
Soldadura con posterior Alivio de tensiones con 2 reparaciones



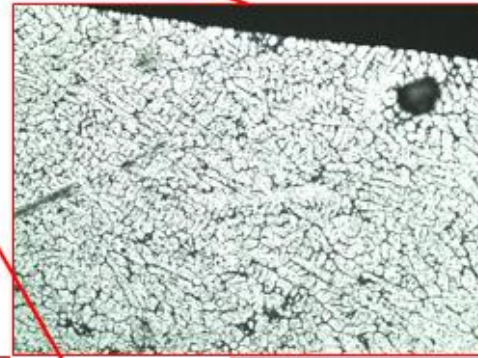
Soldadura con posterior Alivio de tensiones con 3 reparaciones



200X



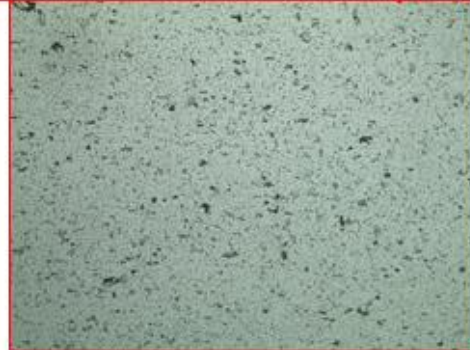
200X



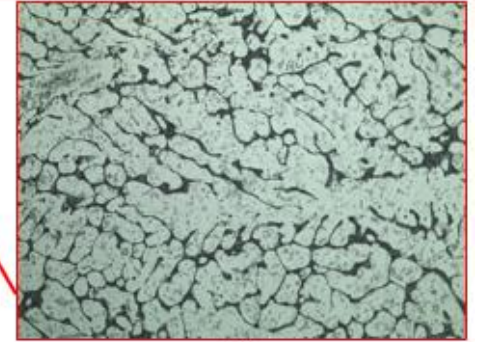
200X



500X

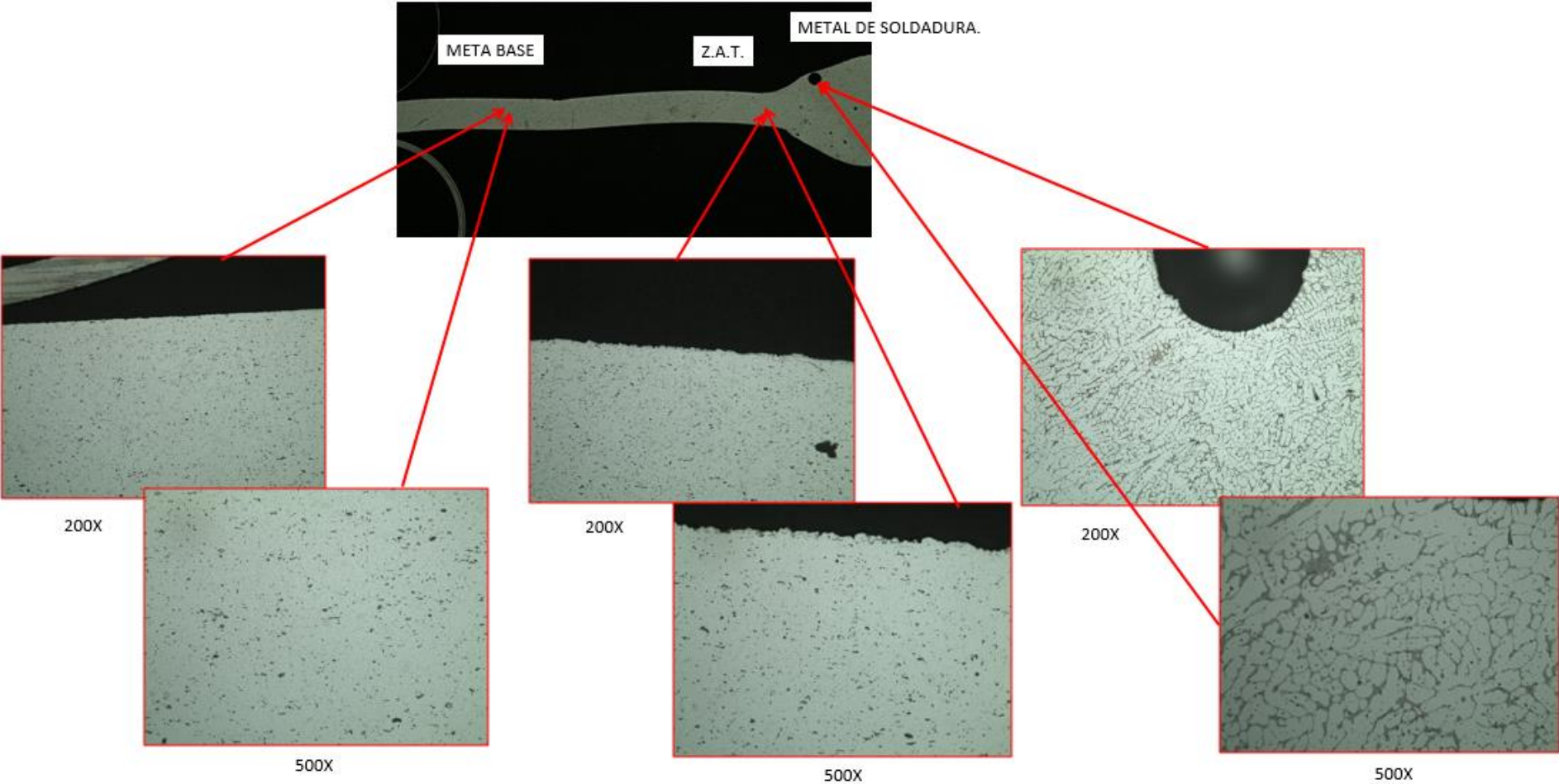


500X

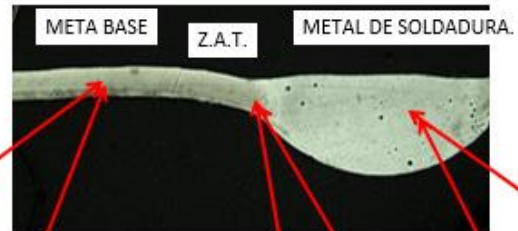


500X

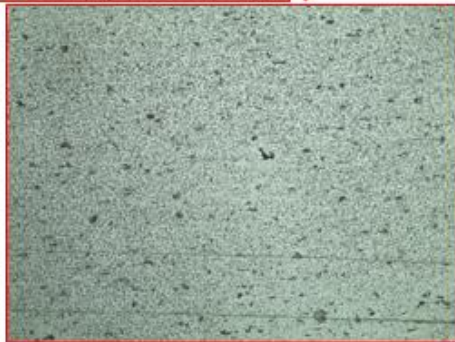
Soldadura con previa solubilización + maduración sin ninguna reparación



Soldadura con previa solubilización + maduración con 1 reparación



200X



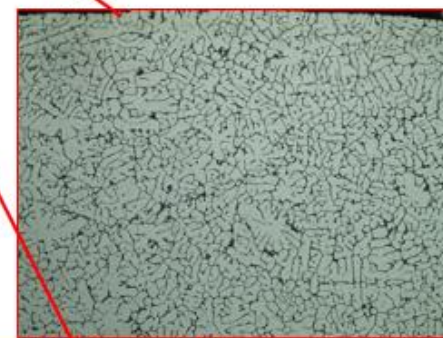
500X



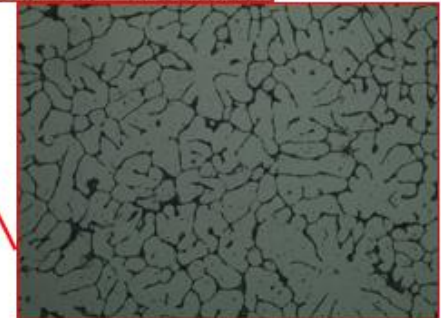
200X



500X

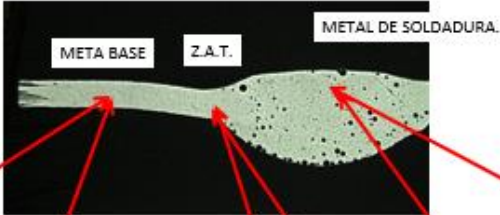


200X

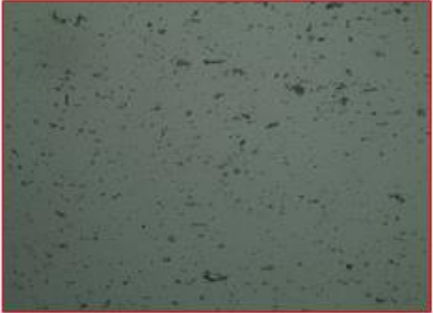


500X

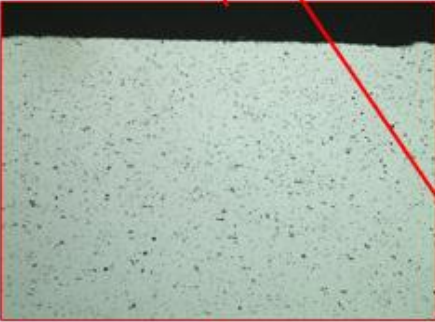
Soldadura con previa solubilización + maduración con 2 reparaciones



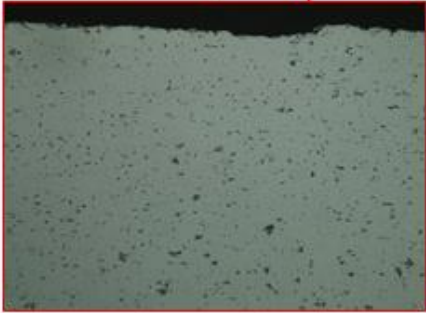
200X



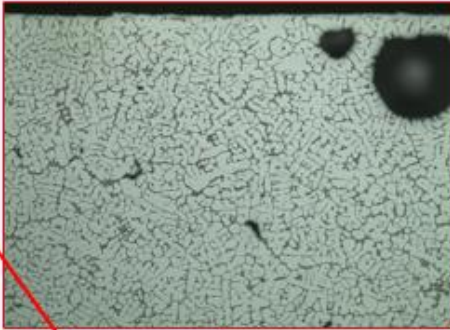
500X



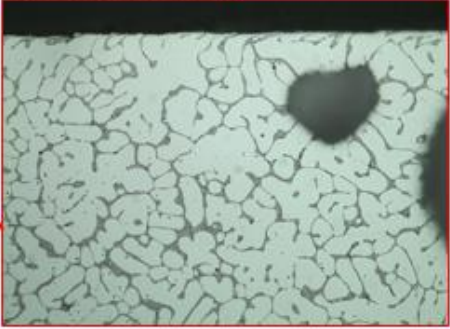
200X



500X

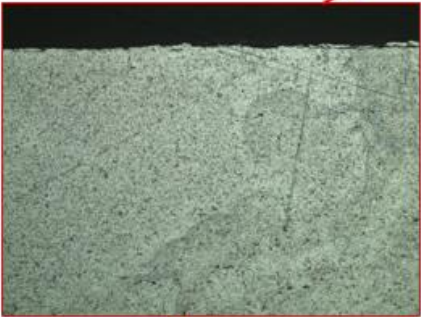
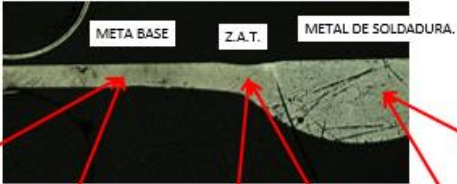


200X



500X

Soldadura con previa solubilización + maduración con 3 reparaciones



200X



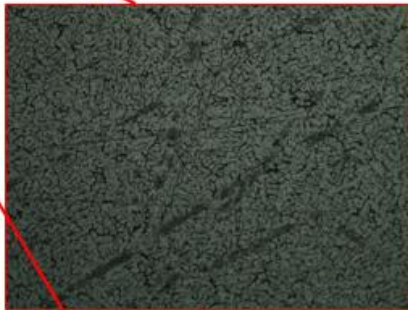
500X



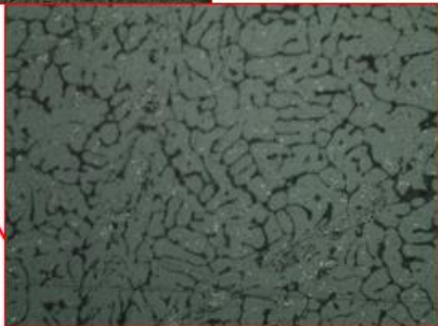
200X



500X

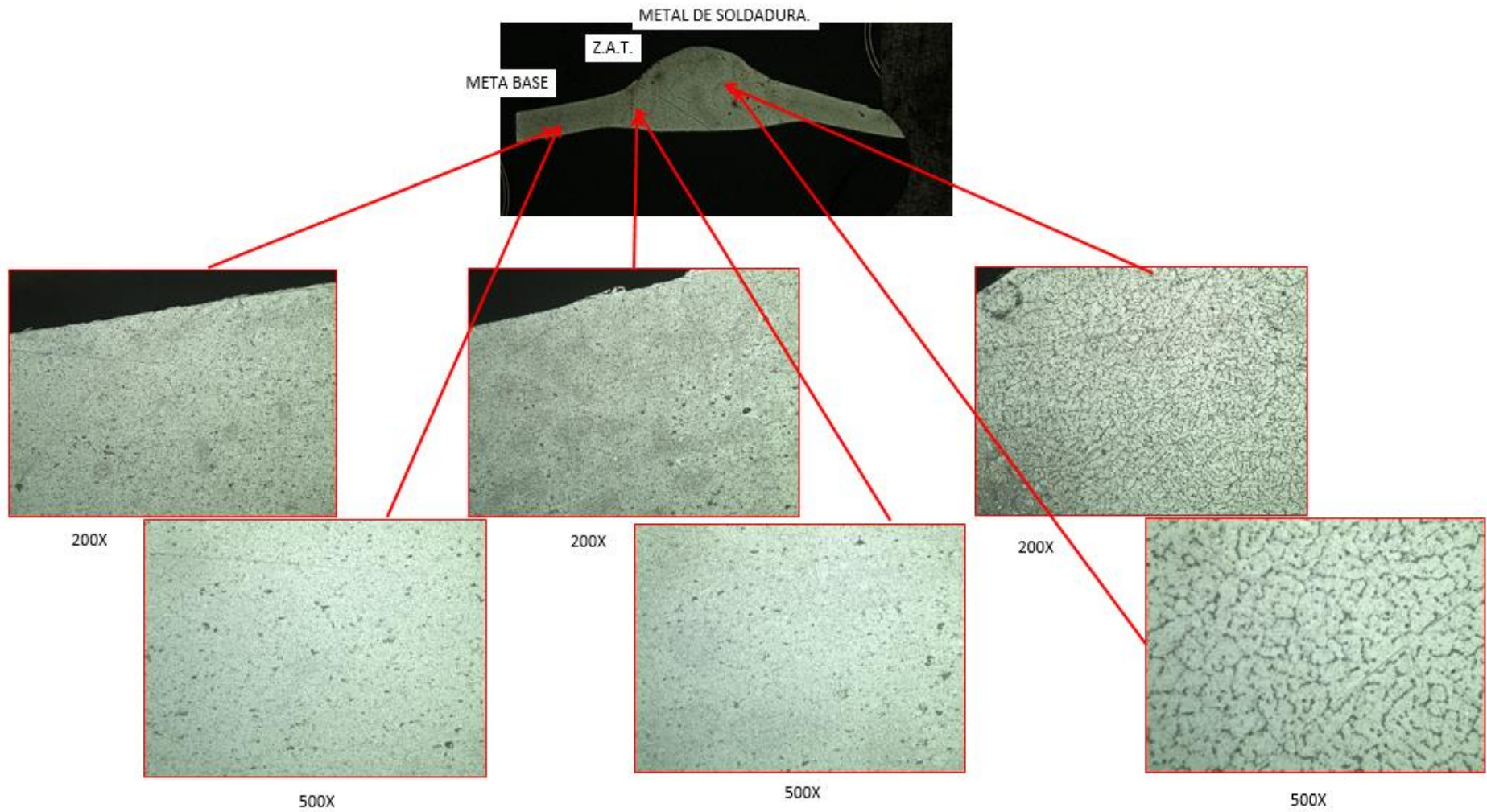


200X

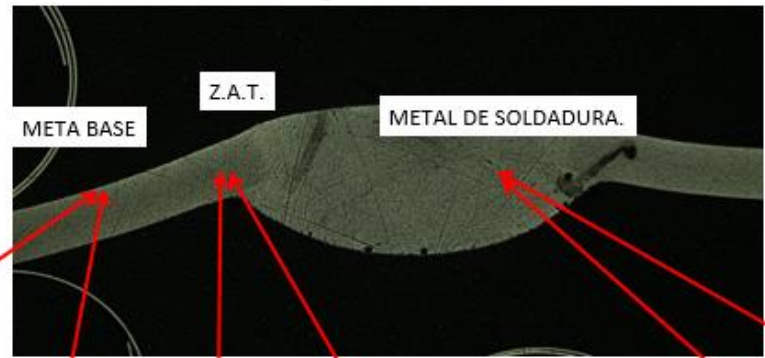


500X

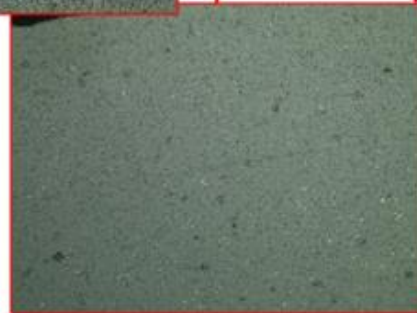
Soldadura con posterior solubilización + maduración sin ninguna reparación



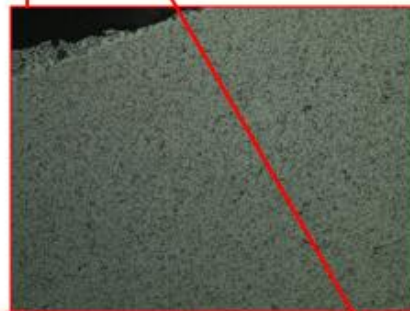
Soldadura con posterior solubilización + maduración con 1 reparación



200X



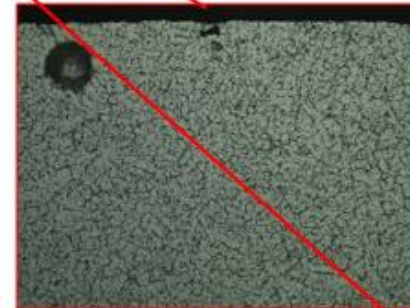
500X



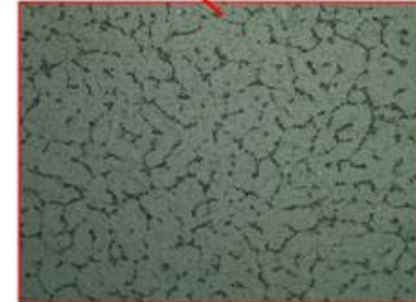
200X



500X

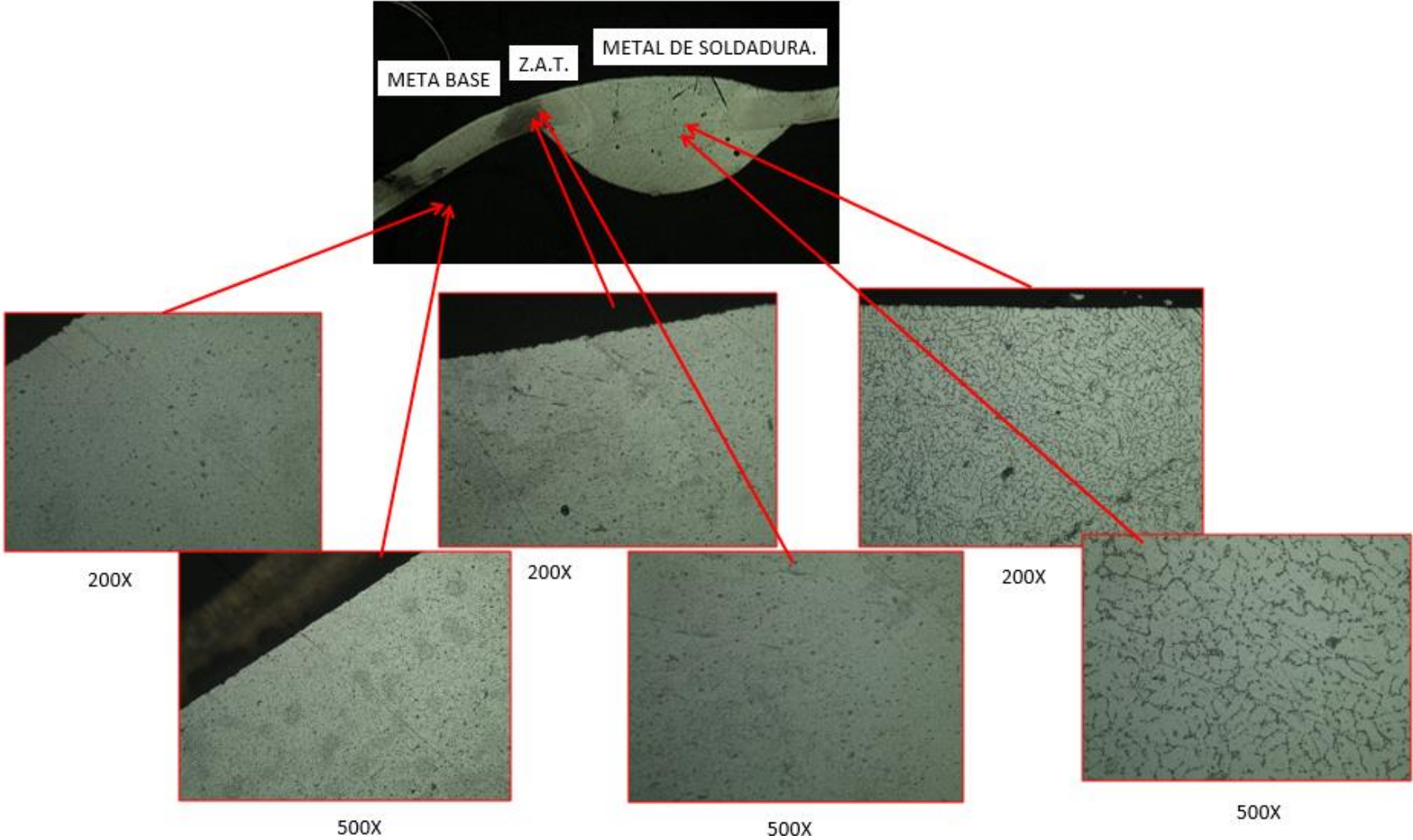


200X

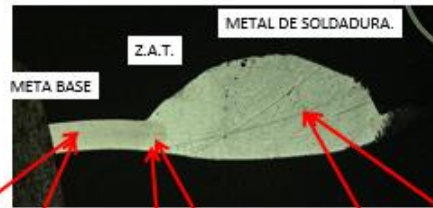


500X

Soldadura con posterior solubilización + maduración con 2 reparaciones



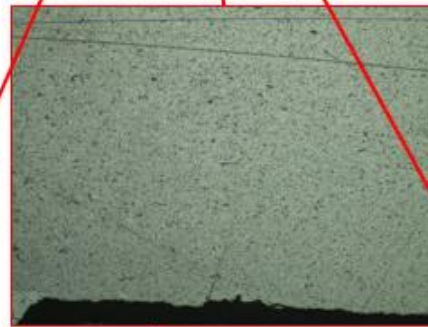
Soldadura con posterior solubilización + maduración con 3 reparaciones



200X



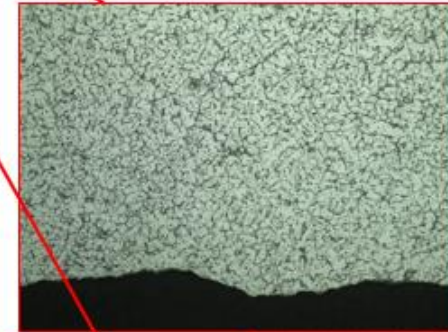
500X



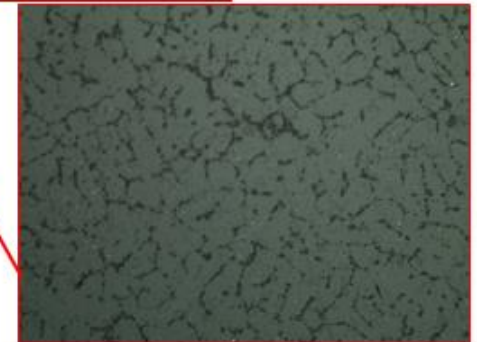
200X



500X

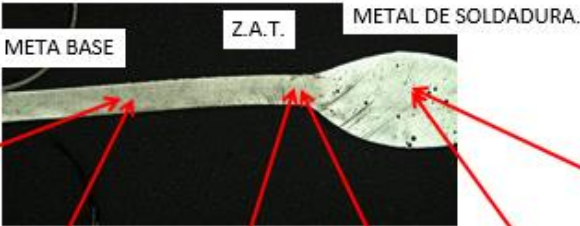


200X

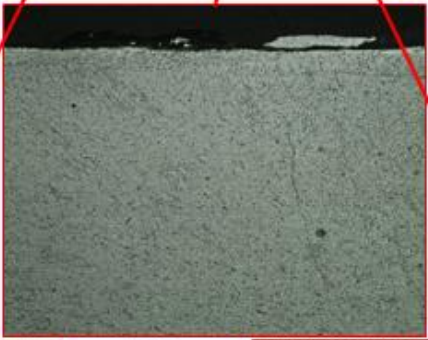


500X

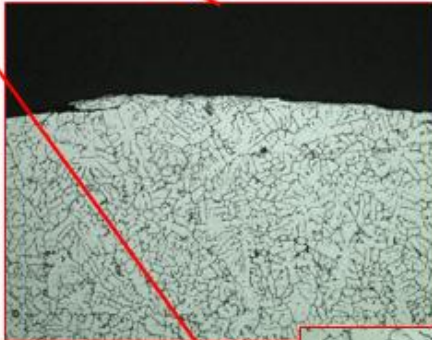
Soldadura con posterior maduración sin ninguna reparación



200X



200X



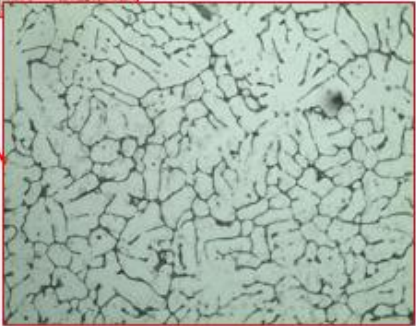
200X



500X

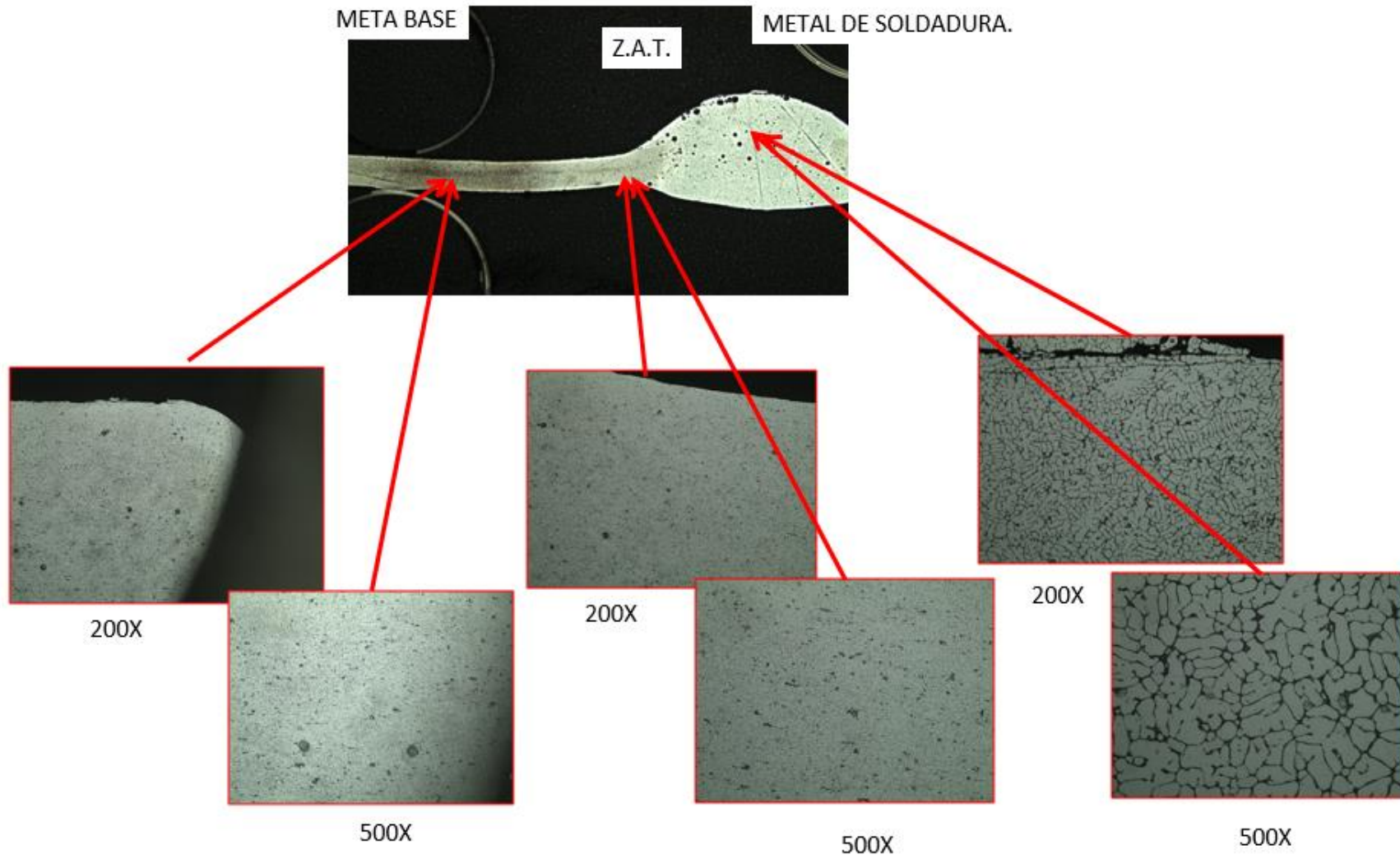


500X

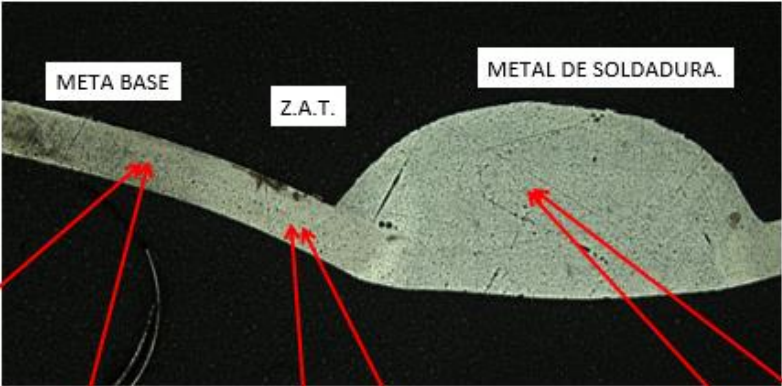


500X

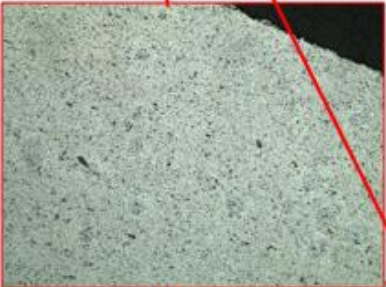
Soldadura con posterior maduración con 1 reparación



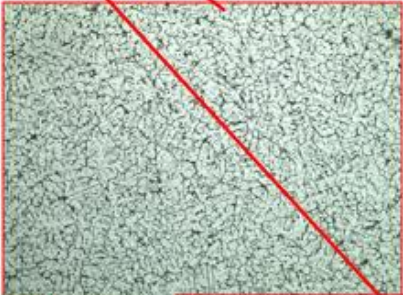
Soldadura con posterior maduración con 2 reparaciones



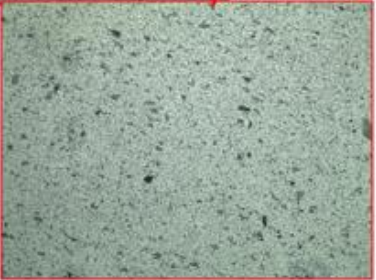
200X



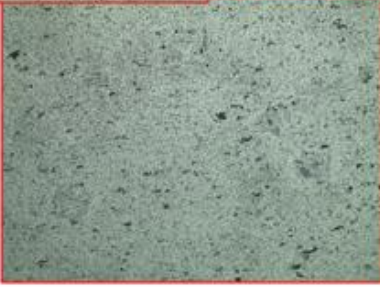
200X



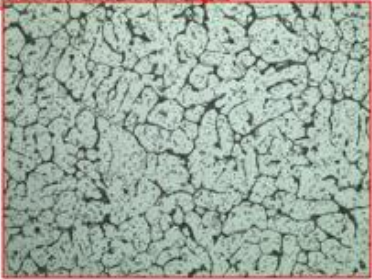
200X



500X

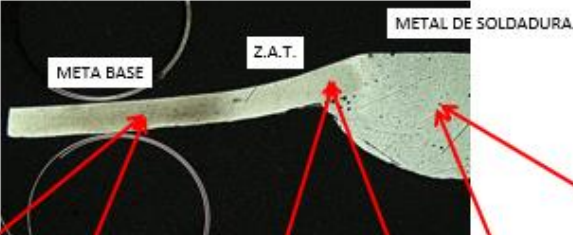


500X

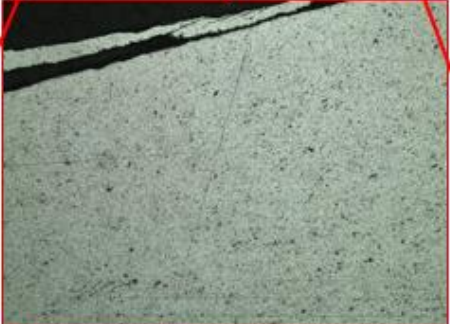


500X

Soldadura con posterior maduración con 3 reparaciones



200X



200X



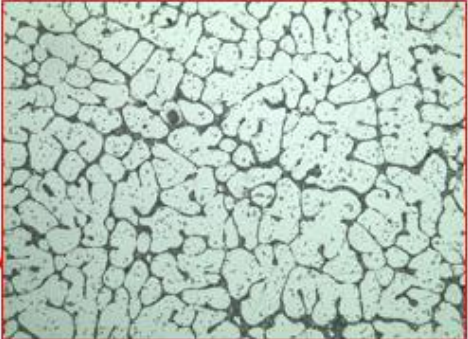
200X



500X

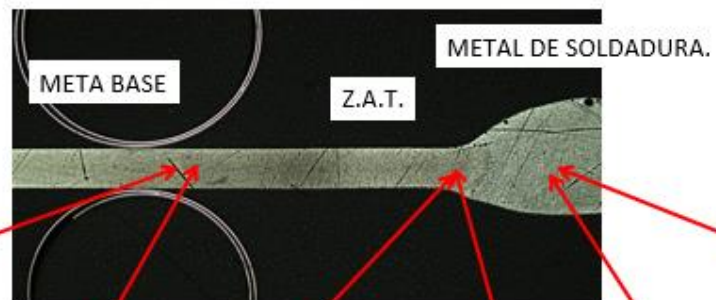


500X

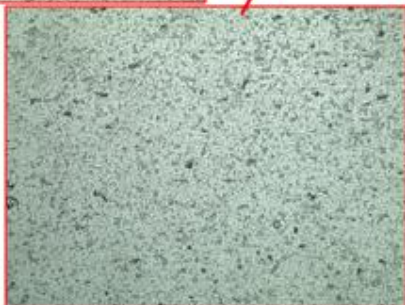


500X

Soldadura con previa maduración sin ninguna reparación



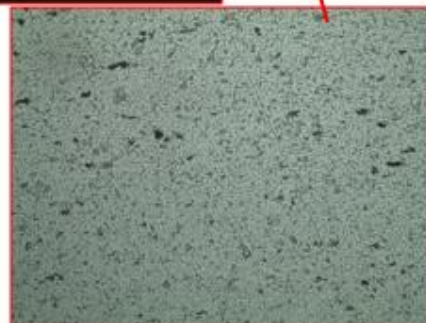
200X



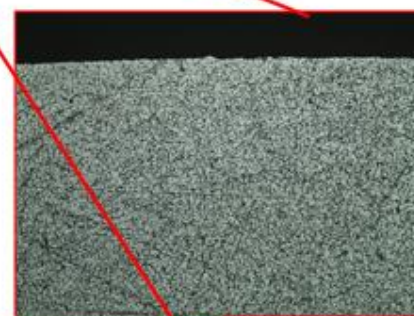
500X



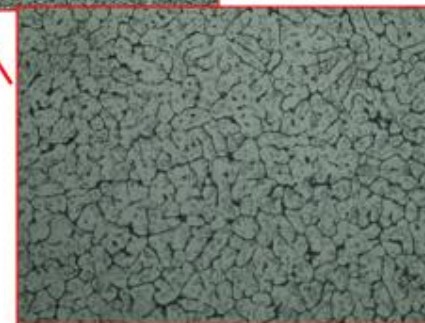
200X



500X

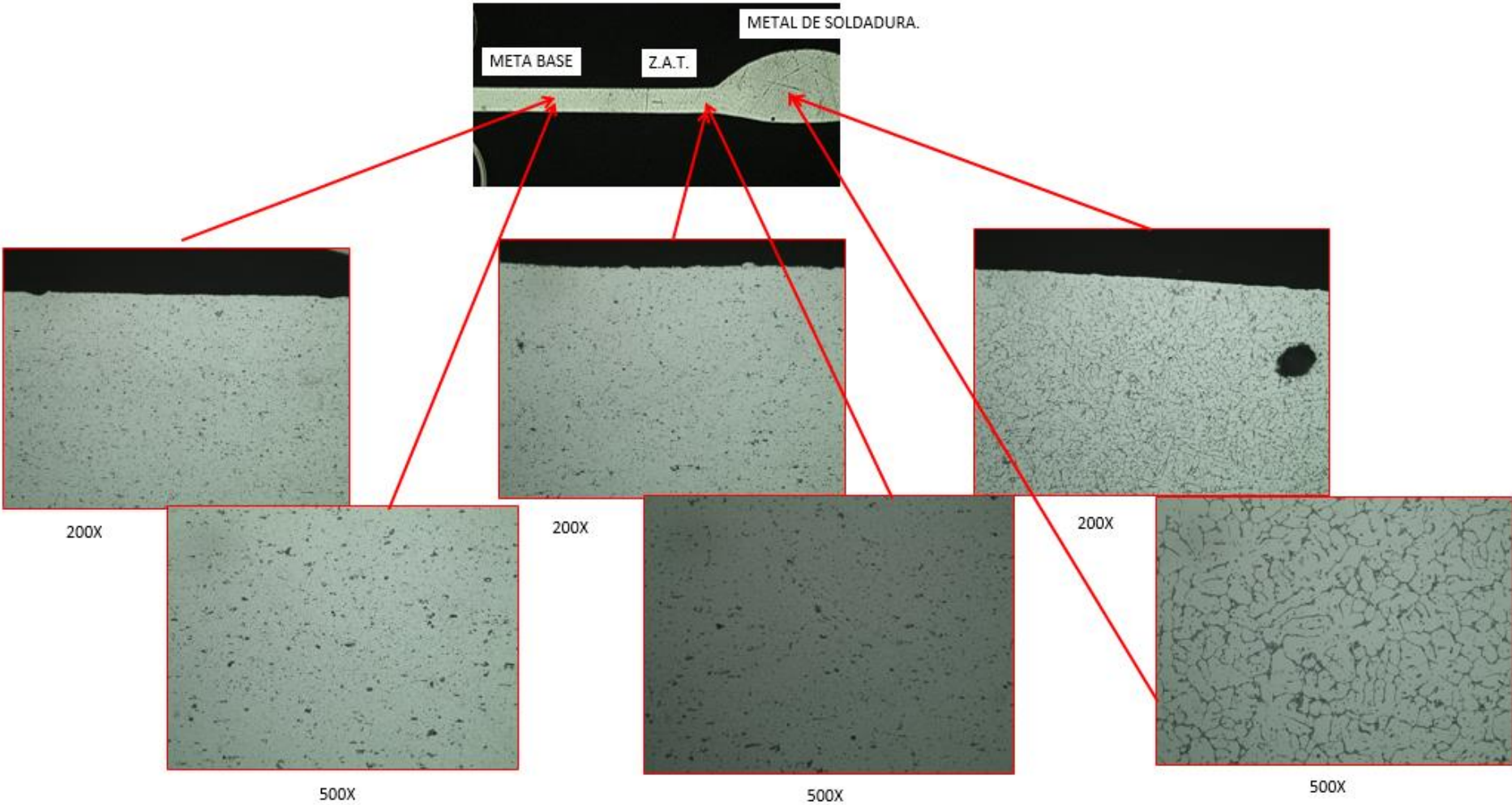


200X

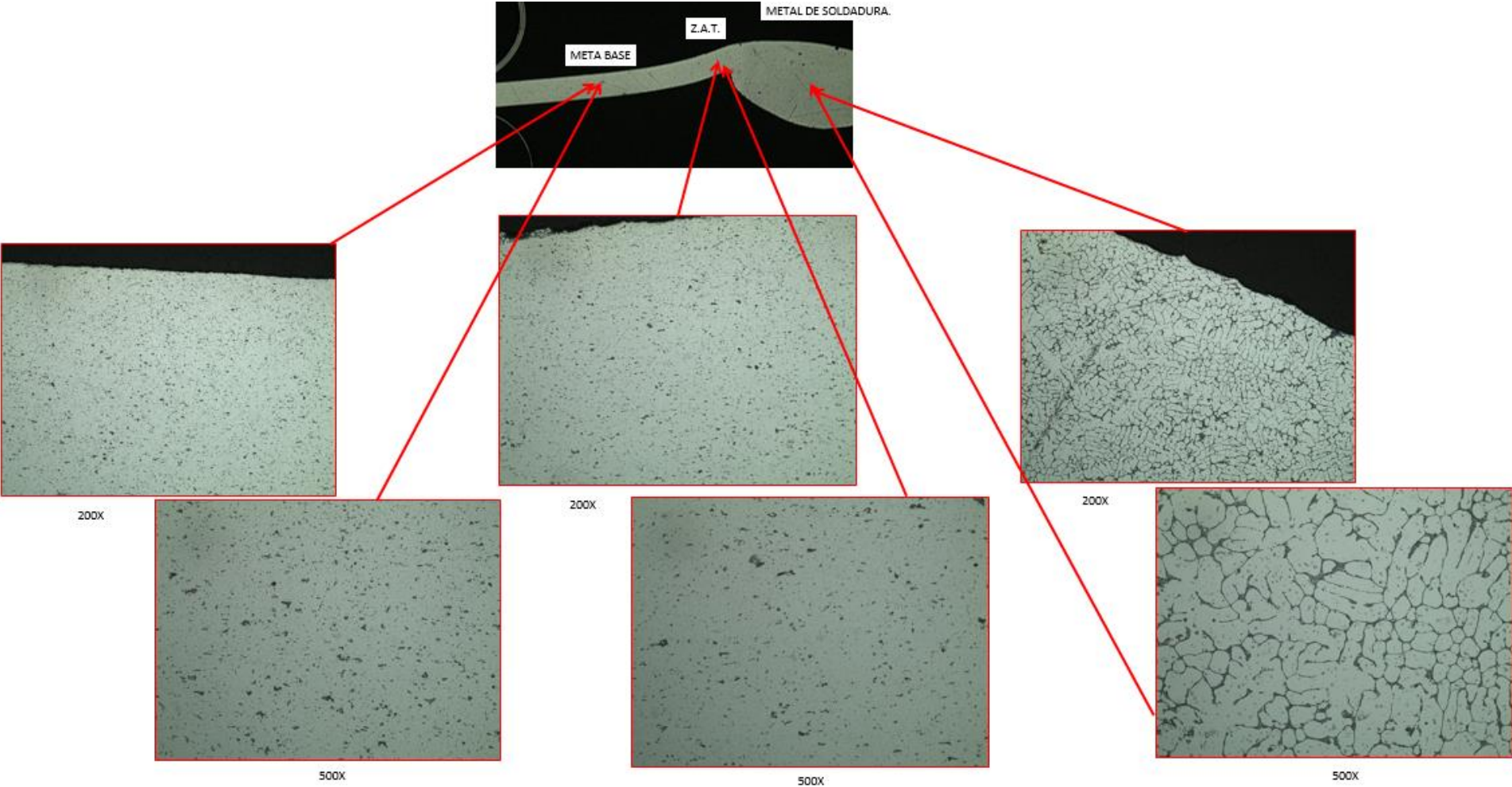


500X

Soldadura con previa maduración con 1 reparación



Soldadura con previa maduración con 2 reparaciones



Soldadura con previa maduración con 3 reparaciones

