



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

Estudio De La Soldabilidad En Continuo  
De Aceros Inoxidables Ferríticos  
Estabilizados Empleados En Los Sistemas  
De Escapes Para La Automoción

**Doctorando:**

Jesús Paralera Romero

**Tutores:**

Francisco J. Parres García  
José E. Crespo Amorós

Septiembre 2023



Agradecimientos.

A mi familia,

Por todo el apoyo que me han dado durante todo este tiempo, donde el ánimo no ha faltado, a pesar de mi mal humor.

A mis tutores,

Por tener la paciencia, además de buscar tiempo de donde no lo había para corregir y guiarme durante todo este tiempo que ha durado esta andadura.

A mis compañeros y jefes,

Por darme la oportunidad de avanzar con la investigación dentro de la compañía Flinsa-Gonvarri precisión Tubes, por no perder la confianza en mí, y ayudarme hasta el final.

En definitiva, quiero agradecer a todos/as los que de un modo otro me habéis ayudado a conseguir lo que hoy se transforma en mi trabajo final de tesis. ¡MUCHAS GRACIAS!



*El que ama la práctica sin la teoría es como el marinero que sube a bordo sin timón ni brújula y nunca sabe dónde acabará.*

**Leonardo Da Vinci**



## **Resumen:**

Este trabajo de investigación ha surgido de la necesidad empresarial de mejora y desarrollo para un nuevo proceso productivo en la compañía flejes industriales (Flinsa). En el año 2011, Flinsa se introduce en la fabricación de tubo de acero inoxidable soldado mediante tecnología láser. Durante el proceso, aparecen una serie de dificultades; entre estas dificultades se encuentra la baja eficiencia del proceso junto con un porcentaje de defectivo, además de numerosas incidencias en cliente.

Esto sucede debido a que el proceso productivo no está controlado. Se desconoce el comportamiento de los materiales, la nueva tecnología, y además, se está generando un fenómeno que produce desconfianza en la calidad de la soldadura, esto es, que el tubo de material de acero inoxidable ferrítico recién soldado no soporta el esfuerzo mecánico al que le someten los ensayos de deformación por aplastado y abocardado, aunque si ese mismo tubo se deja reposar durante 48h en el almacén, este será capaz de soportar esos esfuerzos.

Para comprender bien los fenómenos de soldadura y de proceso, se ha realizado un análisis sobre los 5 factores que pueden actuar sobre la calidad de la soldadura, esos factores han sido, Material, Mano de obra, Máquina, Medio, Método aplicando la metodología de Ishikawa.

Para cada uno de los factores se han desarrollado acciones de mejora que hagan al proceso lo más regular posible, siendo estable de modo que permita, fijando unas condiciones, comparar variables y se vea su grado de interacción en el resultado final.

De este modo se ha llegado a la conclusión que, para que el proceso sea estable, se necesita introducir materia prima con unos parámetros controlados y estandarizados para que la influencia del proveedor sea mínima. Esto queda reflejado en la ficha de compra de materiales. Además, se ha creado un método de trabajo con un estándar de montaje y regulación, donde se garantice la repetibilidad en cada puesta, o se reduzca al máximo la variación del proceso, tomando unos parámetros específicos de referencia, y por último se ha visto que el medio en el que se genera el procesado por láser tiene alto impacto en el resultado de la soldadura, para lo cual se han implementado unas mejoras que reducen la entrada de humedad en la soldadura, aunque no son 100% efectiva.

Se han conseguido los objetivos principales de reducir el porcentaje de defectivo a lo largo de las producciones y los problemas de calidad con los clientes, aunque ha quedado pendiente validar que la fragilización de la soldadura es debida a la disolución de hidrógeno en el baño, y a su atrapamiento en la estructura cuando este solidifica, debido a que no se ha podido contar con los equipos adecuados.

Jesús Paralera  
Director de operaciones  
Flinsa

## **Resum:**

Aquest treball de recerca ha sorgit de la necessitat empresarial de millora i desenvolupament per a un nou procés productiu a la companyia fleixos industrials (Flinsa), aquests l'any 2011 s'introdueixen en el món de la fabricació de tub d'acer inoxidable soldat mitjançant tecnologia làser, apareixent una sèrie de dificultats, entre aquestes dificultats es troba la baixa eficiència del procés, un percentatge de defectiu, a més de nombroses incidències en client.

Això succeeix pel fet que el procés productiu no està controlat, es desconeix el comportament dels materials, la nova tecnologia, i a més, s'està generant un fenomen que produeix desconfiança en la qualitat de la soldadura, això és, que el tub de material d'acer inoxidable ferrític acabat de soldar no suporta l'esforç mecànic al qual li sotmeten els assajos de deformació per esclafat i atrompetat al tub, encara que si aquest mateix tub es deixa reposar durant 48h en el magatzem aquest és capaç de suportar el esforços previstos.

Per a comprendre bé els fenòmens de soldadura, i de procés s'ha realitzat una anàlisi sobre els 5 factors que poden actuar sobre la qualitat de la soldadura, aqueixos factors han sigut, Material, Mà d'obra, Màquina, Mitjà, Mètode aplicant la metodologia de Ishikawa.

Per a cadascun dels factors s'han buscat accions de millora que facen al procés el més regular possible, sent estable de manera que permeti fixant unes condicions comparar variables i es veja el seu grau d'interacció en el resultat final.

D'aquesta manera s'ha arribat a la conclusió que perquè el procés siga estable es necessita, introduir matèria primera amb uns paràmetres controlats i estandarditzats, perquè la influència del proveïdor siga mínima, això queda reflectit en la fitxa de compra de materials. S'ha creat un mètode de treball amb un estàndard de muntatge i regulació, on es garantisca la reproductibilitat en cada posada, o es reduïska al màxim la variació del procés, prenent uns paràmetres de referència, i per últim s'ha vist que el mitjà en el qual es genera el processament per làser té alt impacte en el resultat de la soldadura, per aquest motiu s'han implementat unes millores que redueixen l'entrada d'humitat en la soldadura, encara que no són 100% efectiva.

S'han aconseguit els objectius principals de reduir el percentatge de defectiu al llarg de les produccions i els problemes de qualitat amb els clients, encara que ha quedat pendent validar que la fragilització de la soldadura és deguda a la dissolució d'hidrogen en el bany, i al seu atrapament en l'estructura quan aquest solidifica, pel fet que no s'ha pogut comptar amb els equips adequats.

Jesús Paralera  
Director de operaciones  
Flinsa

## **Summary:**

This study work arises out of the business need for improvement and development to achieve a new production process in the industrial strapping company Flinsa. In 2011, Flinsa begins with the laser technology manufacturing process of welded stainless-steel tube. Nevertheless, a series of difficulties appear along with the process, such as the low efficiency of the process itself, together with a significant defective percentage and several customer incidents.

This happens because the productive process is not controlled. The behavior of the materials and the new technology is unknown, and, besides, a phenomenon is being generated which leads to distrust in the quality of the weld, i.e, the newly welded ferritic stainless-steel tube does not withstand the mechanical strain to which it is subjected by the crushed and flared deformation tests. But, if this same tube settles during 48h in the warehouse, it will be able to withstand such efforts.

To correctly understand the process and welding phenomena, it has been carried out an analysis of the 5 factors that have influence over the welding quality. Those factors are the following: material, labour, machine, medium and method (Ishikawa methodology).

For each of the above factors, improvement actions have been developed to make the process as regular as possible, being stable so that it allows to compare variables by settling previous conditions, and to see its interaction degree in the result.

In this way, it has been concluded that, for the process to be stable, it is necessary to introduce raw material with controlled and standardized parameters so that the influence of the supplier can be minimum. This is reflected in the material purchase sheet. Furthermore, a working method has been created with a standard of assembly and regulation, where repeatability is ensured at each set, or where the process variation is minimized by using specific parameters. And lastly, it has been proven that the medium in which the laser process is taking place has a high impact on the welding result, for which improvements haven been implemented to reduce the input of moisture into the weld, although they are not 100% effective.

The main objectives have been achieved: to reduce the percentage of defectives throughout production, and to minimize quality problems with customers. Although, there is still a pending matter to be validated: the fragilization of the weld is due to the dissolution of hydrogen during the bath and to its entrapment in the structure when it solidifies because it was not available the appropriate equipment.

Jesús Paralera  
Director de operaciones  
Flinsa



# Índice

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>13</b>
1.	Presentación compañía:.....	15
2.	Antecedentes: .....	18
3.	Historia del sistema de escape:.....	21
4.	El acero inoxidable:.....	24
4.1	Tipos de aceros inoxidables. ....	26
4.1.1	Aceros inoxidables martensíticos.....	27
4.1.2	Aceros inoxidables ferríticos .....	30
4.1.3	Aceros inoxidables austenítico .....	34
4.1.4	Aceros inoxidables austeno-ferríticos Dúplex. ....	37
4.1.5	Elementos aleantes en aceros inoxidables: .....	39
4.2	El proceso de obtención del acero inoxidable. ....	40
<b>II.</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>45</b>
1.	Objetivos .....	47
2.	Planificación .....	48
<b>III.</b>	<b>EXPERIMENTAL</b> .....	<b>51</b>
1.	Técnicas experimentales.....	53
1.1	Ensayos de caracterización mecánica. ....	53
1.2	Ensayos caracterización química.....	56
1.3	Análisis metalográfico.....	57
1.4	Procedimiento preparación de probetas metalográficas. ....	60
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>65</b>
1.	Análisis de causas de fallo: .....	67
1.1	Análisis materia prima .....	68
1.1.1	Codificación de las muestras .....	69
1.1.2	Preparación de las muestras .....	69
1.1.3	Observación de la Microestructura. ....	69
1.1.4	Obtención de los Valores de Microdureza. ....	74
1.1.5	Análisis de Composición.....	75
1.1.6	Comparativa de composiciones.....	84
1.1.7	Conclusiones parciales.....	87
1.2	Análisis máquina – método – mano de obra.....	88
1.2.1	Fabricación del tubo. ....	88

1.3	Análisis Medio – condiciones ambientales.....	117
1.3.1	Desarrollo experimental para eliminar el hidrógeno.....	119
1.3.2	Conclusiones parciales.....	135
1.4	Caracterización del tubo soldado y sin soldar.....	136
1.4.1	Proceso de obtención de tubos de acero inoxidable mediante proceso de soldadura.....	137
1.4.2	Preparación de las muestras.....	139
1.4.3	Obtención de los Valores de Microdureza.....	142
1.4.4	Estudio de la dimensión de la zona afectada.....	144
1.4.5	Análisis de la composición.....	149
1.4.6	Efecto de la aplicación de temperatura tras el proceso de soldadura sobre tubo de diámetro 60 mm.....	159
1.4.7	Conclusiones parciales.....	163
1.4.8	Soldadura de alta frecuencia Vs soldadura CO <sub>2</sub> .....	164
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>171</b>
<b>VI.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>176</b>
<b>VII.</b>	<b>APENDICES</b> .....	<b>181</b>



## **I. INTRODUCCIÓN**



## 1. Presentación compañía:

Antes de iniciar el análisis de la problemática existente en la fabricación de tubos de acero inoxidable es importante establecer los orígenes de la empresa donde se ha llevado a cabo esta tesis doctoral. Flinsa es una empresa que centra su actividad en la deformación en frío de flejes de acero, y acero inoxidable con varios espesores y secciones. Desde sus inicios (1975) hasta la actualidad ha sido una empresa en continuo desarrollo y avance tecnológico. Recientemente, Flinsa se incorpora al Grupo Gonvarri Industries (2018) para formar parte de un grupo empresarial con más de 6.000 trabajadores en plantilla, presente en más de 19 países, y que además poseen un total de 45 centros de producción, capaces de manipular más de 5 millones de toneladas de acero, acero inoxidable y aluminio.



Figura VII.1 Resumen cifras Gonvarri Industries.

Dado el volumen de empresa Gonvarri Industries esta subdividida en 4 grandes divisiones, las cuales se pueden ver a continuación:

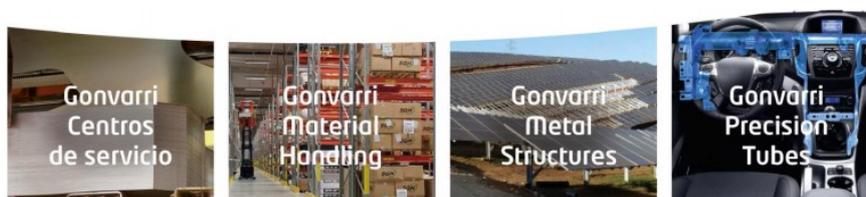


Figura I.2 Divisiones G.I

- **Gonvarri centro de servicios:** Su principal negocio es el suministro de flejes, chapas y procesado mediante láser a sus clientes, representa el volumen más alto de negocio.
- **Gonvarri material handling:** es la división destinada a elementos de almacenamiento, de reciente incorporación.
- **Gonvarri metal structures:** están destinado a la fabricación de estructuras solares, para grandes proyectos de energía solar fotovoltaica, cuentan con la ingeniería y el desarrollo técnico para crear nuevos productos, con seguidores en 1 o 2 ejes, además de estructuras fijas.
- **Gonvarri precision tubes:** división de reciente creación destinada a cubrir las necesidades de la industria en productos tubos de precisión, en cualquier forma, y destinados a múltiples aplicaciones.

Dentro de la división de precisión tubes, se puede destacar:

- Volumen de facturación superior a los 80 M€.
- La componen más de 200 empleados.

- Tienen presencia en más de 25 países.
- Son capaces de procesar más de 150.000 Tm de acero al carbono e inoxidable.

La división está compuesta por 2 plantas productivas situadas geográficamente en diferentes ubicaciones:



Figura I.3 Centros productivos Gonvarri Precision Tubes

La planta de Gonvauto, ubicada en el norte de España, concretamente en Asturias, cuenta con un total de 50 Trabajadores.

Y Flinsa situada en el levante español, cerca de la costa alicantina, en la población de Ibi, zona muy industrializada gracias al juguete.

#### Historia Flinsa:

Flinsa está localizada en el Alicante, dentro del poligo Alfaç en la población de Ibi, actualmente cuenta con una plantilla superior a las 150 personas, y es capaz de procesar más de 40.000 Tm de acero, con un volumen de facturación que ronda los 60 M€.

Flinsa (1975) procede del cambio de nombre de Laminaciones Guitiérrez la cual nace en el año 1972 de la mano de Blas Gutiérrez su fundador, ante la necesidad de la industria del juguete. Sus primeros productos eran laminaciones en frío de flejes de acero para todo tipo de necesidades de la industria. Durante sus primeros años se dedican a la fabricación de fleje, laminación y recocido, actuando como un centro de servicio.



Figura I.4 Vista aérea de Flinsa

Ante la generación de nuevas necesidades del mercado fueron ampliando la gama de productos haciendo una inclusión vertical hacia el cliente.

En 1988, se introducen en la fabricación de tubo de acero soldado ampliando así su portafolio de servicios. Se van incorporando nuevos procesos de corte a medida ante la demanda de los clientes e incrementando el parque de maquinaria.

En 2007 hacen una ampliación duplicando las instalaciones y llegando a 35.000m<sup>2</sup> totales construidos, incrementando su capacidad productiva a las 40.000Tm anuales.

En el año 2011 deciden entrar en el mercado del mundo del inoxidable además del corte y perforado por láser, dando servicio en fleje, chapa, tubo soldado mediante láser y cortado por láser.

En el año 2018 es adquirida por la multinacional Gonvarri Industries, y ha pasado a formar parte de la división de PRECISION TUBES.

A lo largo de los años han ido actualizando y modernizando los procesos productivos teniendo tecnología de última generación.

Seguidamente se muestran los proyectos de investigación desarrollados en Flinsa,

#### **PROYECTOS DE I+D REALIZADOS CON CDTI**

Proyecto nº: IDI 2009-0781

Título: **OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN TUBO SOLDADO DE ACERO**

Tipo Proyecto CDTI INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Periodo de ejecución: 6 de febrero de 2009 a 28 de agosto de 2010

Proyecto nº: IDI-20101320

Título: **TUBO DE ACERO SOLDADO FABRICADO EN SECO**

Tipo Proyecto CDTI INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Fecha Inicio 22/02/2010; Duración 24 MESES

Proyecto nº: IDI-20110383

Título: **TECNOLOGÍAS DE PERFILADO Y DEFORMACIÓN METÁLICA CON MAYOR FLEXIBILIDAD PARA EL DESARROLLO Y FABRICACIÓN DE COMPONENTES ESTRUCTURALES DE AUTOMOCIÓN (PERFLEX) (2/9)**

Tipo Proyecto CDTI INTEGRADOS

Fecha Inicio 13/05/2010

Duración 36 MESES

Proyecto n°: IDI-20150173

Título: **OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA POR HF MEDIANTE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN AVANZADA**

Tipo Proyecto CDTI INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Fecha Inicio 22/09/2014

Duración 24 MESES

Proyecto n°: IDI: 2016-1141

Título: **INTRODUCCIÓN DE ACEROS AHSS (ADVANCED HIGH STRENGTH STEELS)**

Tipo Proyecto CDTI INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Periodo de ejecución: 2016-2019

Horas dedicadas: 285H

Proyecto n°: IDI: 2020-0290

Título: **DESARROLLO DE NUEVOS TUBOS DE ACERO INOXIDABLE CON ALTO VALOR TENOLÓGICO PARA SECTOR AUTOMOCIÓN MEDIANTE TECNOLOGÍA DE SOLDADURA LÁSER DE CO<sub>2</sub>**

Tipo Proyecto CDTI INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Periodo de ejecución: 2020-2021

Horas dedicadas:

AÑO 2020 HITO 1: 340H

AÑO 2021 HITO2: 190H

## 2. Antecedentes:

EL proyecto de investigación surge de la necesidad de la compañía Flinsa, cuando decide introducirse en el mercado del acero inoxidable fabricando tubos soldados mediante tecnología láser de CO<sub>2</sub>, a finales del año 2011.

Durante la fabricación de tubo de acero inoxidable de grado ferrítico, los tubos soldados no eran capaces de resistir los ensayos destructivos de aplastado y abocardado requeridos por la norma de fabricación de tubo. UNE-EN 10296-2=2007. Los porcentajes de chatarra y el producto no conforme eran muy elevados, los rendimientos de proceso eran muy bajos, y las reclamaciones de cliente eran una constante. El proceso no estaba controlado, generando inseguridad en el proceso de soldadura.

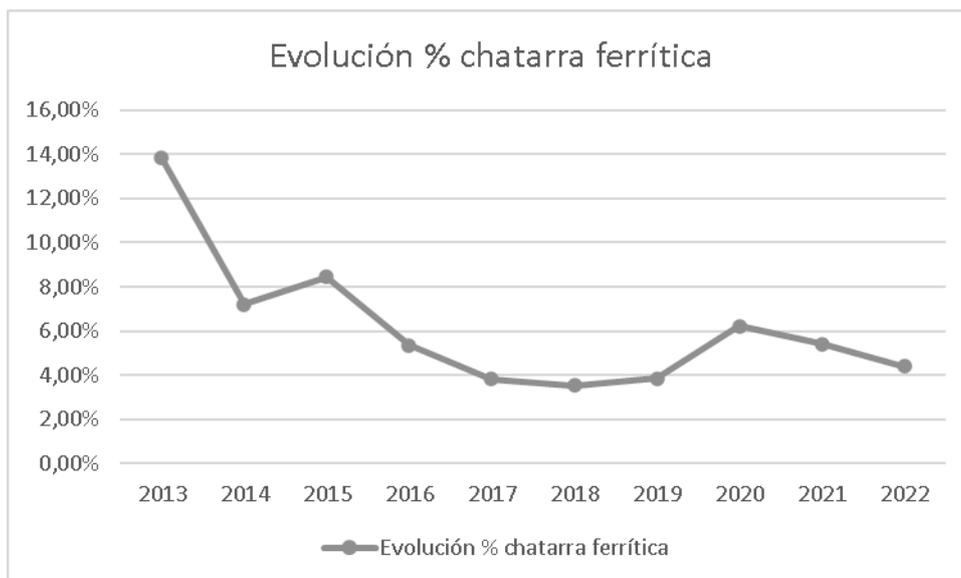


Figura I.5 Tendencia del porcentaje de chatarra

En la figura superior se puede ver la tendencia que ha seguido la evolución de la chatarra, (*scrap*) en los últimos 10 años, de esta manera se puede apreciar el desarrollo técnico que mediante la aplicación de acciones de mejora se han ido realizando, profundizando en el conocimiento del proceso y los materiales, para llegar a reducir el defectivo de proceso en más de 10 puntos porcentuales, pasando desde el 14% en sus orígenes a menos de un 4% en el año 2018. cuando apareció la Covid-19, en el año 2020, se produjo un repunte debido a los cambios de operarios en el proceso y a la poca producción del acero inoxidable.

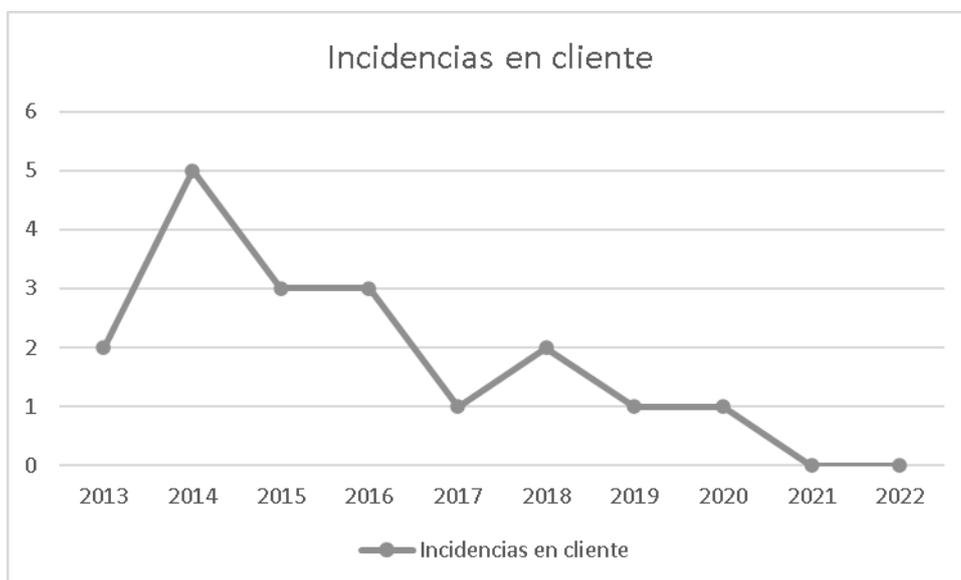


Figura I.6 Evolución de incidencias en cliente.

Por otro lado, no sólo se ha reducido el porcentaje de producto defectuoso, también se ha reducido considerablemente las incidencias de los clientes que usan de manera continuada los productos generados por Flinsa.

Los diversos productos que se fabrican en Flinsa tienen su principal destino en el sector de la automoción, sector de especial relevancia en la industria española. Concretamente, el producto está destinado al sistema de escape de gases instalados en los vehículos de combustión. La conducción de los gases de escape en los motores de combustión interna del automóvil, requieren en primer lugar de unas buenas propiedades mecánicas, las cuales deben permanecer incluso a altas temperaturas y, en segundo lugar, deben presentar buena resistencia frente a fenómenos de corrosión.

El sector de la fabricación de vehículos en España es un sector que a pesar de los diferentes altibajos que ha mostrado a lo largo del tiempo mantiene las cifras de producción bastante constantes en los últimos treinta años. Si bien es cierto que se pueden observar ciertas caídas de producción que coinciden con crisis económicas (2008) y crisis sanitarias (2019).

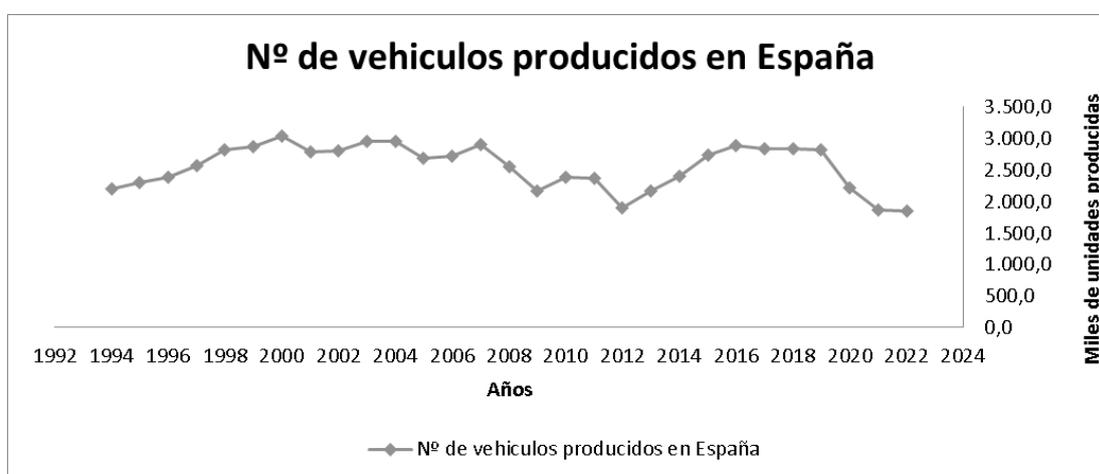


Figura I.7 Evoluciones vehículos producidos en España

El proyecto de fabricación de tubo soldado con acero inoxidable arranca a finales del año 2011, cuando la curva de producción de vehículos en España empieza a crecer después la gran crisis económica que atraviesa España desde el año 2008. En ese tiempo el mercado necesita de fabricantes de tubos de acero inoxidable soldado para cubrir los cupos de producción que requiere la industria automotriz española.

De este problema surge la necesidad de profundizar en el tipo de material, proceso y reacciones fisicoquímicas que se dan mientras se ejecuta la soldadura en los materiales de acero inoxidable en grados ferríticos, además de poder establecer métodos de trabajo seguro, generando procedimientos y estándares de trabajo.

Los grados ferríticos más comúnmente utilizados en los sistemas de escape, son los aceros inoxidables ferríticos estabilizados, ordenados de menor % de Cr a mayor.

- 1.4512
- 1.4510
- 1.4509

### 3. Historia del sistema de escape:

Con el fin de entender la importancia de los materiales utilizados en el sistema de escape, es relevante conocer cuál ha sido la evolución histórica de este sistema a lo largo de la evolución de los vehículos.

En los primeros motores de combustión interna, los gases de escape simplemente salían del motor a través de un orificio en el bloque del motor. Pero pronto se descubrió que los gases de escape eran peligrosos y contaminantes, y se necesitaba una forma de controlar su liberación a la atmósfera.



Figura I.8 Carl Benz. Primeros vehículos de combustión. 1886.

En 1899, el fabricante de automóviles francés Peugeot fue uno de los primeros en utilizar un tubo de escape en sus vehículos. El tubo de escape permitía que los gases de escape fueran dirigidos fuera del vehículo, lejos del conductor y los pasajeros.

A medida que los motores se hacían más potentes y rápidos, los tubos de escape también evolucionaron. Se desarrollaron diferentes formas y tamaños de tubos de escape para diferentes aplicaciones, como los motores de avión y los motores de carreras de automóviles.

En la década de 1950, los tubos de escape se convirtieron en un elemento de estilo importante en los coches deportivos. Muchos fabricantes comenzaron a producir tubos de escape dobles y cuádruples para mejorar el aspecto de sus vehículos.

Unos de los primeros fabricantes en incluir el acero inoxidable como material para la fabricación de los sistemas de conducción de gases fue el americano Walker en el año 1941.

El acero inoxidable comenzó a utilizarse en la fabricación de tubos de escape en la década de 1950. Antes de esto, los tubos de escape se fabricaban típicamente con acero aluminizado o acero al carbono, que eran menos resistentes a la corrosión y tenían una vida útil más corta que el acero inoxidable.

El acero inoxidable es una aleación de hierro, cromo además de otros elementos aleantes que se caracteriza por su resistencia a la oxidación y la corrosión. Esto lo hace ideal para su uso en tubos de escape, donde está expuesto a altas temperaturas y productos químicos corrosivos como los gases de combustión del motor térmico.

Además de su durabilidad, el acero inoxidable también tiene una apariencia estética atractiva y se ha utilizado en tubos de escape personalizados y de alto rendimiento para mejorar el aspecto y el rendimiento de los vehículos, a partir del año 2008 el inoxidable ha sido el material utilizado por excelencia en los elementos del sistema de escape.

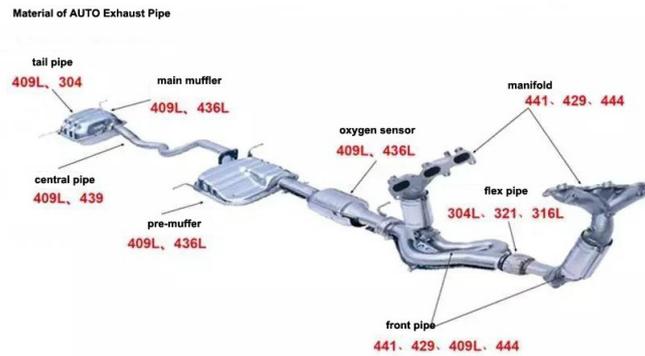
En la actualidad, los tubos de escape han evolucionado para cumplir con las regulaciones ambientales y de seguridad. Los convertidores catalíticos se han agregado a los sistemas de escape para reducir las emisiones contaminantes, y los sistemas de escape de doble y triple capa se utilizan para reducir el ruido y proteger a los pasajeros del calor excesivo.

El sistema de escape es un sistema complejo, no se trata de un simple conducto por los que los gases de combustión circulan desde un punto hacia la parte trasera del vehículo. El sistema de escape está formado por diversas zonas en las que se requieren distintas propiedades a los materiales que se utilicen. Es por ello que se hayan utilizado varios grados de acero inoxidable en la fabricación de tubos de escape a lo largo de los años. Algunos de los grados de acero inoxidable más comunes se incluyen en la tabla adjunta.

Tabla I.1 Partes de los sistemas de evacuación de gases y materiales utilizados

Parte del sistema	Colector de escape	Tubo delantero	Tubo flexible	Convertidor catalítico	Tubo central	Silenciador principal	Tubo final de cola
<b>Temperatura de servicio °C</b>	450-950		600-800		400-600	100-400	
<b>Propiedades requeridas</b>	Resistencia a altas temperaturas Resistencia a la fatiga térmica Resistencia a la oxidación Buen procesado		Resistencia a altas temperaturas Buen procesado Resistencia a daños por sal		Resistencia a daños por sal	Resistencia a la corrosión en las superficies internas (condensación) Resistencia a la corrosión en superficies exteriores (daños por sal)	
<b>Materiales empleados</b>	1.4512 1.4510 1.4509 1.4113 1.4521	1.4301	1.4512 1.4526 1.4113	1.4512	1.4512	1.4512	1.4512 1.4510 1.4509 1.4526

En la siguiente imagen se pueden ver los diferentes componentes de los que pueden estar compuestos los sistemas de escape, hay tubos de conducción, silenciosos, salidas de colectores, etc....



Figural.9 Línea de tubo de escape con materiales típicos

A continuación, se indican las características de los aceros inoxidable que pueden aparecer a lo largo de todo el sistema de escape.

1. Acero inoxidable tipo 1.4512 (AISI 409): es un grado de acero inoxidable ferrítico que es resistente a la corrosión y se utiliza comúnmente en sistemas de escape de automóviles y camiones ligeros. Es resistente al calor y es más económico que otros grados de acero inoxidable.
2. Acero inoxidable tipo 1.4301 (AISI 304): es un grado de acero inoxidable austenítico que se utiliza en sistemas de escape de alto rendimiento debido a su resistencia a altas temperaturas y corrosión. Es resistente a la oxidación y es más caro que el acero inoxidable tipo 1.4512 (AISI 409).
3. Acero inoxidable tipo 1.4541 (AISI 321): es un grado de acero inoxidable austenítico que se utiliza en sistemas de escape de alto rendimiento debido a su alta resistencia a la corrosión y la oxidación a altas temperaturas. Es más caro que los grados de acero inoxidable 1.4512 (AISI 409) y tipo 1.4301 (AISI 304).
4. Acero inoxidable tipo 1.4401 (AISI 316): es un grado de acero inoxidable austenítico que se utiliza en sistemas de escape marinos y de alto rendimiento debido a su alta resistencia a la corrosión en ambientes marinos y altas temperaturas. Es más caro que los otros grados de acero inoxidable mencionados anteriormente.



Figural.10 Diferentes componentes del tubo de escape, empresa Silenciosos Falces

#### 4. El acero inoxidable:

El acero inoxidable fue descubierto en el siglo XX, al borde del comienzo de la primera guerra mundial, su nacimiento está comprendido entre 1912 y 1914, en 1912 el metalúrgico alemán Pasel de la empresa Krupp solicita dos patentes en Alemania, para un tipo de acero 18% Cromo – 8% níquel (acero austenítico), ésta patente fue concedida en 1918, mientras en Gran Bretaña se está realizando la primera colada industrial de acero inoxidable tipo martensítico en el año 1913 por el metalúrgico británico Harry Brearly, en la siderurgia de Firth Brown. Brearly estaba trabajando en el desarrollo de aceros de alta calidad para herramientas cuando notó que una aleación de hierro y cromo que había creado era resistente a la corrosión. Brearly se dio cuenta de que esta aleación podría ser útil en una variedad de aplicaciones, y así nació el acero inoxidable martensítico. En el año 1914 en los Estados Unidos, Dantsiezen investigador de la compañía General Electric puso a punto la producción de un acero inoxidable ferrítico con sólo cromo.

Los primeros usos del acero inoxidable fueron dados a elementos anti-desgaste, como las válvulas de los motores térmicos de combustión interna utilizados en la primera guerra mundial y a la cuchillería.

Desde su descubrimiento, el acero inoxidable ha evolucionado en una variedad de formas. Se han desarrollado una gran variedad de nuevos grados y aleaciones de acero inoxidable, cada uno diseñado para cumplir con requisitos específicos de aplicaciones. Además, la tecnología de producción ha mejorado significativamente, lo que ha permitido la producción de acero inoxidable de alta calidad a un costo más bajo.

En la actualidad, el acero inoxidable se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, desde la fabricación de utensilios de cocina hasta la industria aeroespacial y automotriz. Debido a su resistencia a la corrosión, el acero inoxidable se ha convertido en un material esencial en muchas industrias y es valorado por su durabilidad, estética y resistencia a altas temperaturas.



Figura I.11 Distintas aplicaciones del acero inoxidable

El acero inoxidable es una aleación de hierro, carbono, y cromo en más de 10,5%, según la norma En 10088-1. El cromo es el elemento principal en el acero inoxidable, siendo este el que da la resistencia a la corrosión. Además del cromo, también se utilizan otros metales como el níquel, el molibdeno y el titanio para mejorar las propiedades mecánicas y químicas.

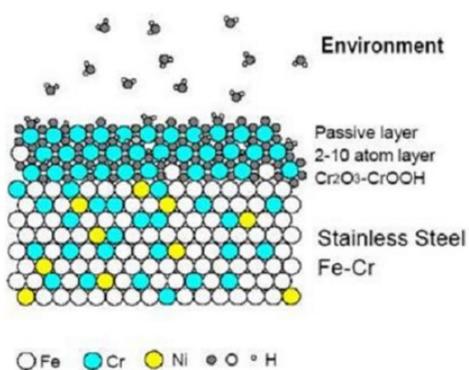


Figura I.12 Fenómeno generación capa pasiva en acero inoxidable

El efecto de la resistencia a la corrosión, lo provoca una capa de óxido de cromo que recubre toda la superficie expuesta a la oxidación del ambiente, esta capa es impermeable, tenaz, resistente, además, será más resistente cuanto más Cr, Mo, N esté presente en la aleación.

Esta superficie de óxido de apenas unas micras se le llama capa pasiva, y tiene la propiedad de regenerarse frente a su pérdida, siempre que el oxígeno que le rodea sea suficiente para poder generar el fenómeno de oxidación y el Cr esté en % de la aleación por encima del 10.5%.

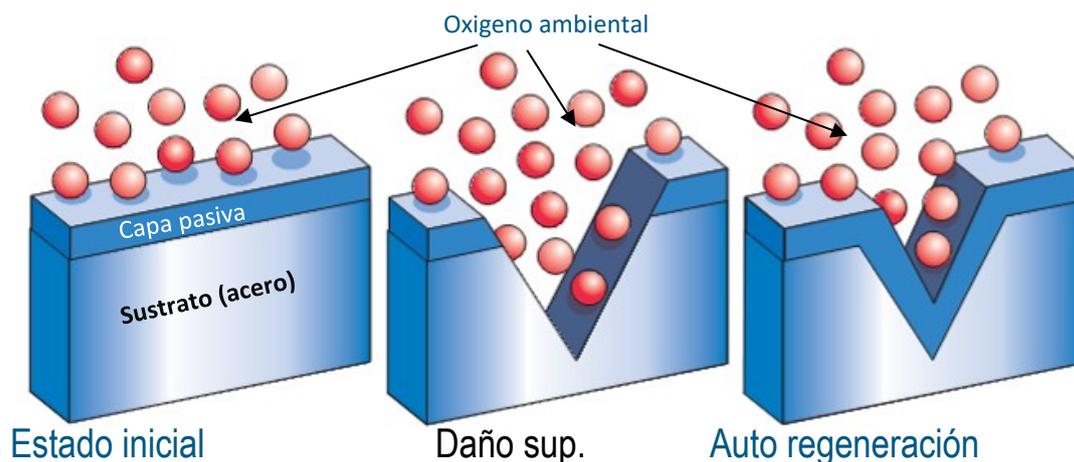


Figura I.13 Proceso de regeneración de la capa pasiva

Ejemplo de regeneración de la capa pasiva en una superficie dañada, por un agente externo.

#### 4.1 Tipos de aceros inoxidables.

Los aceros inoxidables pueden ser agrupados por la estructura cristalina que los forma, esta estructura es dependiente de los elementos que forman la aleación, es decir de su composición química, según se observa en diagrama inferior se pueden distinguir los siguientes tipos,

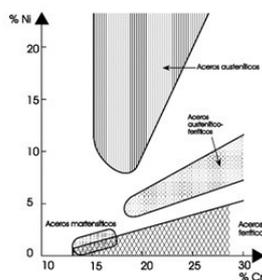


Figura I.14 diagrama del tipo de acero inoxidable en función del %Ni -%Cr.

1. Aceros inoxidables martensíticos.
2. Aceros inoxidables ferríticos
3. Aceros inoxidables austeníticos
4. Aceros inoxidables dúplex

#### 4.1.1 Aceros inoxidables martensíticos

Los aceros inoxidables martensíticos suponen el 3% del consumo total de acero inoxidable, tienen un alto porcentaje de Carbono, además de ser los que se le puede hacer un tratamiento térmico para endurecerlos.

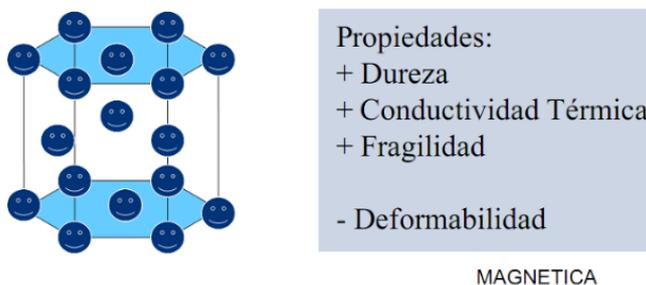


Figura I.15 Estructura cristalina acero inoxidable martensítico después del temple - principales características

Los aceros inoxidables martensíticos se caracterizan por tener una estructura cristalina hexagonal compacta, producto de un tratamiento térmico de templado.

Los elementos aleantes de mayor importancia son el Carbono, Cromo y Níquel, sus porcentajes tipos se encuentra en la siguiente tabla:

$$0,10\% < C < 1,4\%$$

$$12\% < Cr < 18\%$$

$$0\% < Ni < 4\%$$



Figura I.16 Metalografía típica acero inoxidable martensítico después del temple.

Su micrografía tipo acero AISI 420, se puede observar en la imagen superior. La martensita es una fase rica en carbono, frágil y extraordinariamente dura. Los aceros inoxidables martensíticos tienen la característica común de ser magnéticos y endurecibles por tratamiento térmico, presentando cuando templados una microestructura acicular (en forma de agujas).

Este tipo de acero inoxidable generalmente suele ser el menos resistente a la corrosión, tiene un grado de soldabilidad bajo, debido al alto porcentaje de carbono en comparación con los otros grupos.

Tabla de designaciones aceros inoxidables martensíticos.

En la siguiente tabla se pueden ver equivalencias entre normas europeas y americanas en de cada tipo de acero inoxidable martensítico.

Tabla I.2 Principales grados de aceros inoxidables martensíticos

<b>Designación</b>	<b>Designación</b>	<b>Designación</b>
<b>Simbólica EN</b>	<b>Numérica EN</b>	<b>AISI/ASTM</b>
<b>X12Cr13</b>	1.4006	410
<b>X20Cr13</b>	1.4021	420
<b>X30Cr13</b>	1.4028	420
<b>X46Cr13</b>	1.4034	420
<b>X50CrMoV15</b>	1.4116	420MoV
<b>X70CrMo15</b>	1.4109	440A
<b>X90CrMo18</b>	1.4112	440B
<b>X105CrMo17</b>	1.4125	440C

En la siguiente tabla se pueden apreciar las diferentes aplicaciones que tienen este tipo de aceros inoxidables, la mayoría de ellas van destinadas a elementos de alta fricción como son cuchillería, álabe de turbinas, etc, seguidamente se muestra un resumen de las principales aplicaciones,

Tabla I.3 Grados de acero inoxidables martensíticos y sus principales aplicaciones

<b>TIPO</b>	<b>APLICACIONES</b>
<b>1.4021</b>	cuchillería, discos de freno, equipos quirúrgicos, odontológicos, turbinas.
<b>1.4006</b>	Equipos para refinación de petróleo, válvulas, componentes de bombas y cuchillería.
<b>1.4112</b>	Cuchillos de corte (profesionales)

En el diagrama inferior se puede observar como de un material base con adición o eliminación de elementos aleantes se pueden elaborar otros grados de este tipo de acero inoxidable.

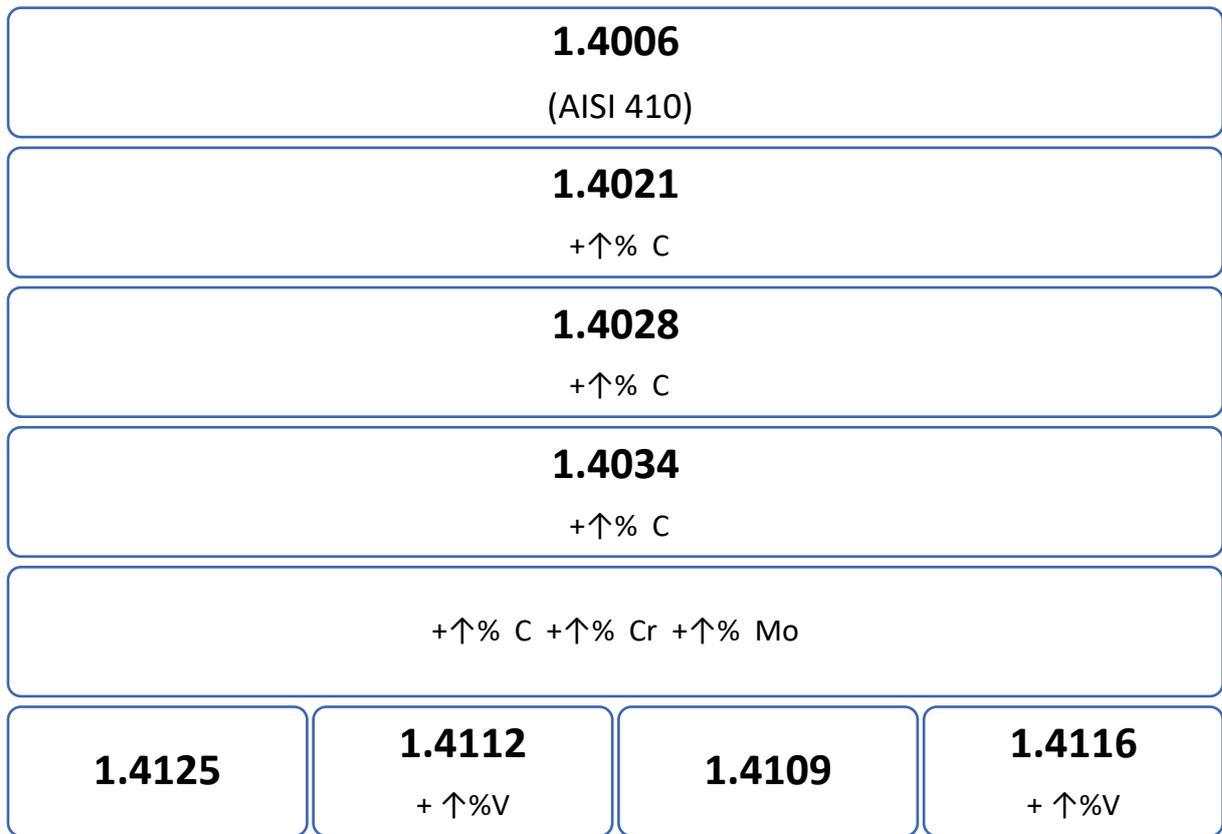


Figura I.17 Principales aceros inoxidables martensíticos derivados del tipo 1.4006

#### 4.1.2 Aceros inoxidables ferríticos

Los aceros inoxidables ferríticos, están incrementando su consumo debido a las mejoras de características que se les están aplicando producto de nuevas combinaciones de elementos aleantes y rutas de proceso. Además, son más económicos que los aceros inoxidables austeníticos, al no llevar níquel como elemento aleantes, pudiendo ser sustitutos en multitud de aplicaciones de los grados austeníticos.

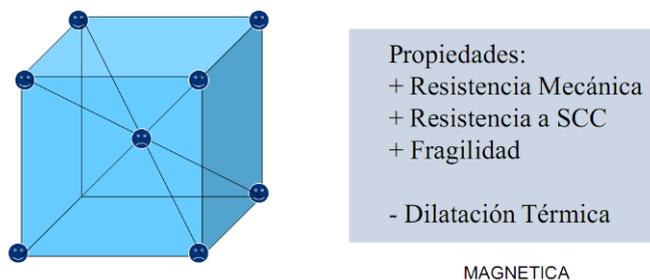


Figura I.18 Estructura cristalina acero inoxidable ferrítico - características principales.

Este tipo de acero se caracteriza por tener una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo.

Están formados al 100% por ferrita a temperatura ambiente, este grado no admite tratamiento térmico para ser endurecido.

Su soldabilidad es moderada, aunque se le pueden añadir elementos aleantes que la mejore, como son el Niobio o el Titanio, actuando como estabilizadores, además de reducir el porcentaje de Carbono.

Los elementos de mayor importancia son el carbono y el cromo, además de otros encontrando su presencia como sigue:

$$0,01\% < \mathbf{C} < 0,35\%$$

$$16\% < \mathbf{Cr} < 28\%$$

Otros elementos: Mn, Si, P, S, Mo, Ti, Nb, Cu.

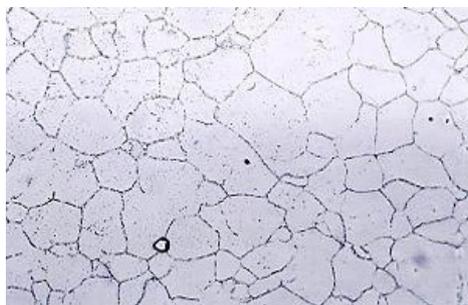


Figura I.19 Metalografía tipo de un acero inoxidable ferrítico.

Metalografía tipo de un acero inoxidable ferrítico serie 400. En ella se puede observar una única fase con algún precipitado, con una morfología "regular" en su tamaño.

Presenta buena resistencia frente a la corrosión en medios sulfurosos, pero por el contrario se comportan mal en medios cloruros.

Se comportan bien antes los cambios de temperatura no generando cascarilla, ni perdiendo exceso de masa, ante los ciclos térmicos, a diferencia de los aceros inoxidable austeníticos, por esta razón son de gran uso en las líneas de evacuación de los gases de escape en la industria automotriz, es decir son empleados como material para la construcción de los tubos de escape, o en situaciones donde se den ciclos térmicos constantes.

Dentro de los grados ferríticos se pueden englobar 5 subfamilias, estos subgrupos se elaboran en función de la composición química de la aleación.

- **Grupo 1**, son los que contienen de un 10% al 14% de cromo, son los de más bajo coste de todos.
- **Grupo 2**, su contenido en cromo varía entre un 14% a un 18%, estos no poseen elementos estabilizadores. Presentan unas mejores características a la corrosión que el grupo 1, y son los más utilizados dentro del grado ferrítico. Pueden ser sustitutos en determinadas condiciones del grado austenítico 1.4301.
- **Grupo 3**, son como el grupo 2 pero además se les añaden elementos estabilizadores como el Titanio (Ti) o Niobio (Nb). Estos elementos hacen que presente una mejor soldabilidad y conformabilidad, también pueden ser sustitutos en determinadas condiciones de los grados austeníticos.

Estos 3 grupos representa casi el 91% del total de los aceros ferríticos.

- **Grupo 4 y 5**, representan apenas el 9% del total, y son aleaciones con más elementos aleantes que las anteriores.

Tabla I.4 Principales grados de aceros inoxidable ferríticos.

Designación	Designación	Designación
Simbólica EN	Numérica EN	AISI/ASTM
<b>X6CrAl13</b>	1.4002	405
<b>X2CrTi12</b>	1.4512	409
<b>X6Cr13</b>	1.4000	410S
<b>X6Cr17</b>	1.4016	430
<b>X3CrTi17</b>	1.4510	439
<b>X2CrMoTi18-2</b>	1.4521	444
<b>X2CrTiNb18</b>	1.4509	441

En la tabla superior se pueden observar las diferentes designaciones de algunos de los aceros inoxidable ferríticos más utilizados, la designación según la EN 10.088-1 europea numérica y simbólica, además de la nomenclatura americana que es la más extendida en su uso de manera generalizada.

Tabla I.5 Grados de acero inoxidable ferrítico y sus principales aplicaciones.

<b>TIPO</b>	<b>APLICACIONES</b>
<b>1.4016</b>	Cubiertos, vajillas, cocinas, piletas, monedas, revestimientos, mostradores, frigoríficos, lavadoras, paneles interiores, cazuelas sartenes.
<b>1.4512, 1.4510, 1.4509</b>	Silenciadores y escapes de automóviles; contenedores, autobuses, recientemente para bastidores de monitores LCD.
<b>1.4521, 1.4526</b>	Aplicaciones en ambientes costeros y entonos altamente corrosivos.

En esta tabla se pueden observar algunas de las principales aplicaciones del acero inoxidable ferrítico, sobre todo son uso en interiores, y aplicaciones de automoción, conducciones de sistemas de escape, aunque también comienzan a sustituir a algunos aceros inoxidables austeníticos, en aplicaciones concretas.

En la gráfica inferior se pueden observar cómo de un material base de partida se puede elaborar el resto de los grados, adicionando nuevos elementos de aleación o eliminándolos.

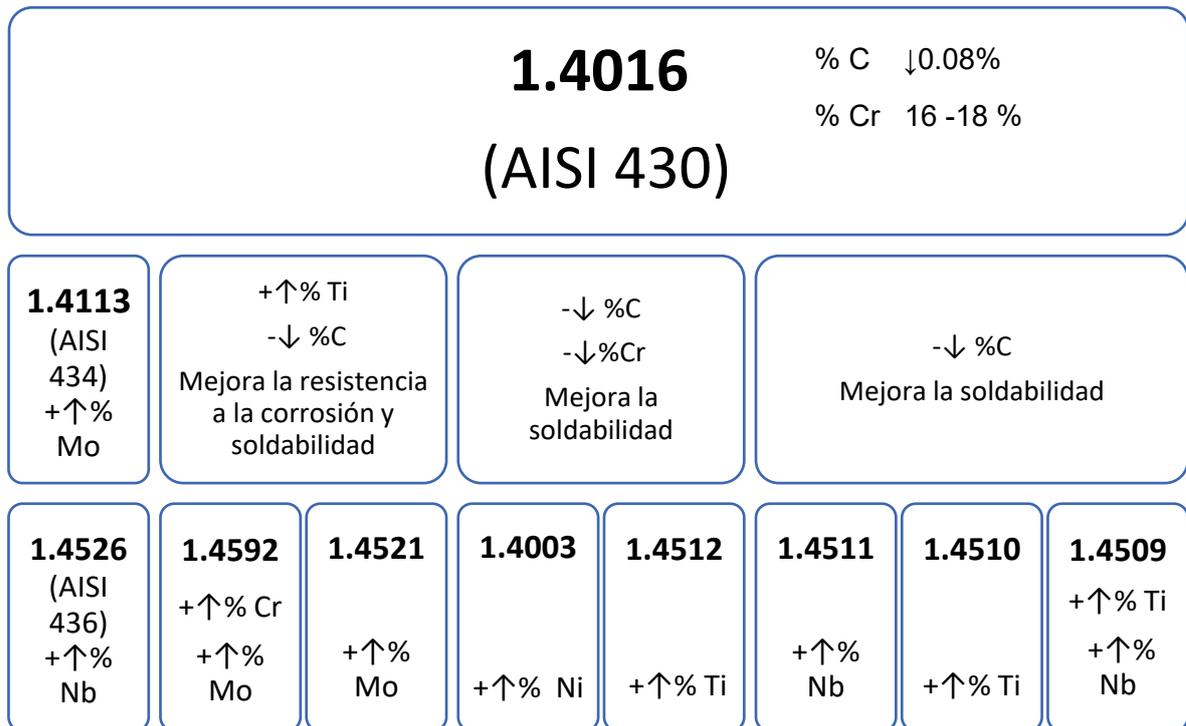


Figura I.20 Principales aceros inoxidable ferríticos derivados del tipo 1.14016

### 4.1.3 Aceros inoxidables austenítico

Estos aceros suponen cerca del 90% del consumo mundial, son los más extendidos gracias a su gran resistencia a la corrosión y a sus propiedades mecánicas, su principal desventaja es el precio, al poseer más elementos aleantes especiales que los otros principales tipos de aceros inoxidables,

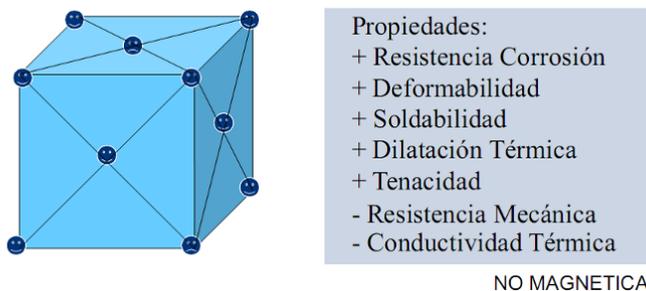


Figura I.21 Estructura cristalina acero inoxidable austenítico - principales características

Su composición química genera granos austeníticos con una estructura cristalina cúbica centrada en las caras en más de un 95%, a temperatura ambiente, (apenas un 5% de ferrita en los de alta calidad)

Los elementos aleantes más importantes dentro de la familia de los aceros inoxidables austeníticos son los siguientes:

- C < 0,15%
- 16% < Cr < 27%
- 8% < Ni < 31%
- Otros elementos: 0% < Mo < 7%, Mn, Si, P, Ti, Nb, Cu, N, W, Al, V, B



Figura I.22 Metalografía típica de acero inoxidable austenítico

Este tipo de acero inoxidable no es magnético, ya que presenta poca ferrita en su estructura, es residual su presencia, además poseen una gran cantidad de níquel aleado (desde 6% hasta 27% los especiales).

De forma general son el grupo que presentan mejor resistencia a la corrosión, excepto en atmósferas sulfurosas.

Sus propiedades mecánicas resistentes mayores que la de los ferríticos, y además presentan una alta deformabilidad, llegando algunos grados hasta el 65%, presenta una gran tendencia a la adquisición de acritud, además son aptos para aplicaciones tanto a alta temperatura como a criogénicas. Son los que mejor soldabilidad poseen.

Tabla I.6 Principales grados de aceros inoxidable austeníticos.

<b>Designación</b>	<b>Designación</b>	<b>Designación</b>
<b>Simbólica EN</b>	<b>Numérica EN</b>	<b>AISI/ASTM</b>
<b>X10CrNi18-8</b>	14.310	301
<b>X2CrNi18-7</b>	14.318	301LN
<b>X5CrNi18-10</b>	14.301	304
<b>X2CrNi18-9</b>	14.307	304L
<b>X8CrNi 25-21</b>	14.845	310S
<b>X5CrNiMo17-12-2</b>	14.401	316
<b>X3CrNiMo17-13-3</b>	14.436	316
<b>X2CrNiMo17-12-2</b>	14.404	316L

En la siguiente tabla se pueden observar los grados más conocidos y de mayor uso.

Tabla I.7 Grados de acero inoxidable austenítico y sus principales aplicaciones.

<b>TIPO</b>	<b>APLICACIONES</b>
<b>1.4301, 1.4307</b>	Cubiertos, vajillas, cocinas, piletas, revestimientos, mostradores, frigoríficos, lavadoras, paneles exteriores, cazuelas sartenes.
<b>1.4401, 1.4407</b>	Aplicaciones de exteriores sometidas a cloruros, como ambientes costeros. Barandillas, mobiliario, náutica.
<b>1.4310</b>	Aplicaciones de alta resistencia por deformabilidad. Resortes.

En la tabla superior se pueden observar algunos de los grados más destacados dentro de esta familia y sus principales aplicaciones.

En la figura inferior se puede observar, como partiendo de un material base se pueden conseguir el resto de los grados, adicionando elementos aleantes o eliminando su concentración.

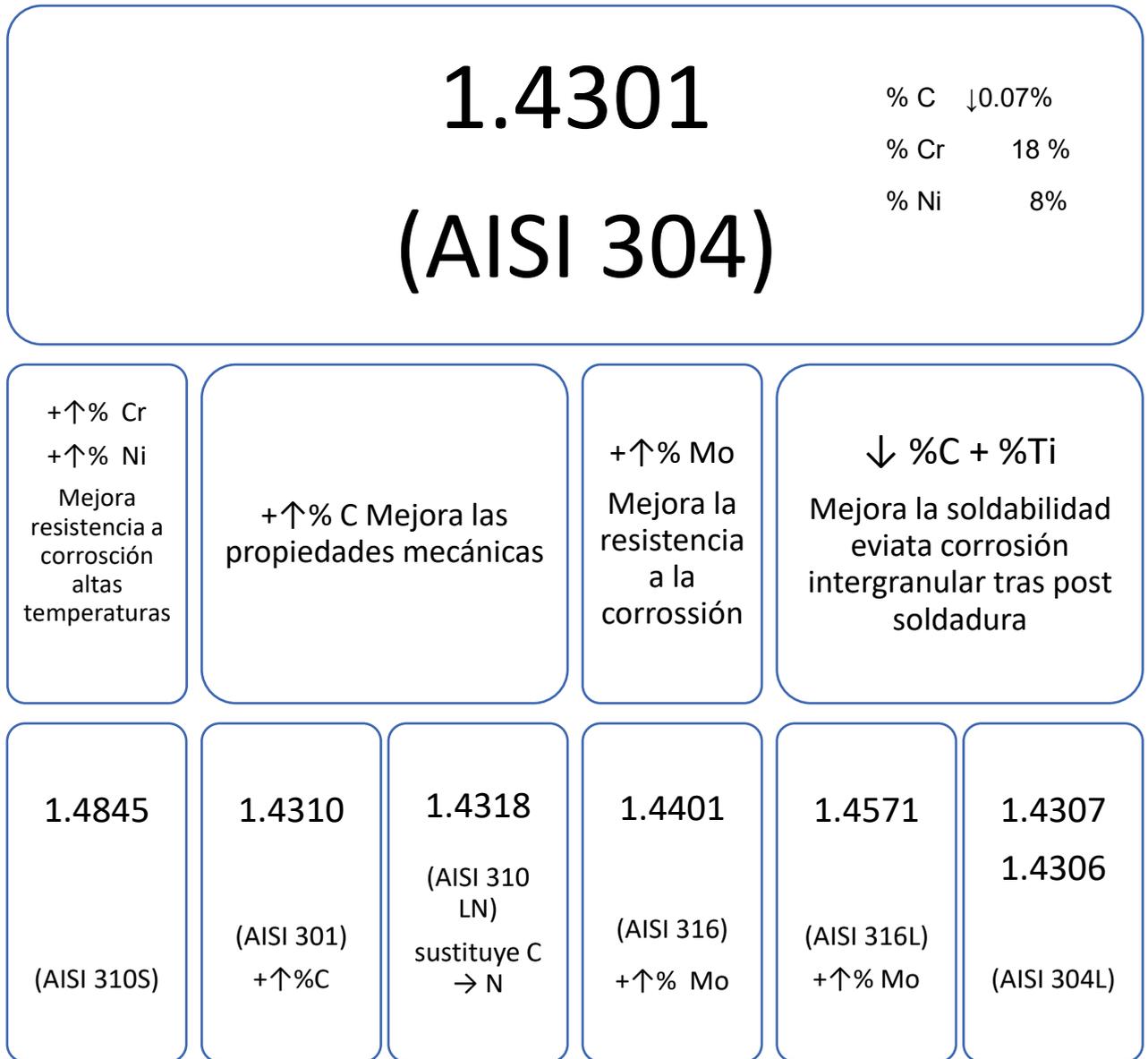


Figura I.23 Principales aceros inoxidables austeníticos derivados del tipo 1.4301.

#### 4.1.4 Aceros inoxidable austeno-ferríticos Dúplex.

Los aceros inoxidable dúplex o austeno-ferríticos son aleaciones de hierro, cromo, níquel y molibdeno que forman una mezcla de austenita (60-40%) y ferrita (40-60%). Los contenidos típicos de los elementos de aleación en estos aceros son:

- $C < 0,05\%$
- $18\% < Cr < 25\%$
- $3\% < Ni < 6\%$
- $0\% < Mo < 4\%$
- Otros elementos: Mn, Cu, Si, P, S, N.

##### Sus características generales son:

- La estructura dúplex mejora la resistencia a la corrosión bajo tensión en ambientes con iones cloruro.
- Son magnéticos.
- Su soldabilidad, tenacidad y ductilidad son buenas, intermedias entre las de los aceros austeníticos y ferríticos.
- No se endurecen por tratamiento térmico, por ejemplo, temple, pero sí por deformación en frío o en caliente.

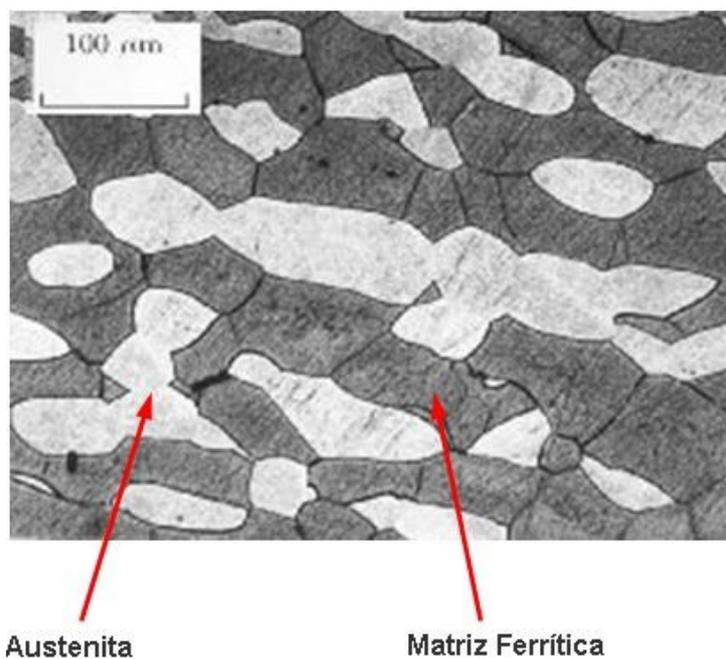


Figura I.24 Microestructura acero inoxidable dúplex. (acero inoxidable austeno -ferrítico)

Las principales aplicaciones de los aceros inoxidable dúplex son en la industria petroquímica, como elementos estructuras en infraestructuras, depósitos y

conducciones de elementos muy corrosivos, o en elementos de trabajo en temperaturas extremas.

Tabla I.8 Principales grados de acero inoxidable dúplex.

Designación	Designación	Designación
Simbólica EN	Numérica EN	AISI/ASTM
X2CrNiMoN22-5-3 <sup>(6)</sup>	1.4462 <sup>(6)</sup>	2205
X2CrNiN23-4 <sup>(9)</sup>	1.4362 <sup>(9)</sup>	2304
X2CrNiMoN25-7-4 <sup>(9)</sup>	1.4410 <sup>(9)</sup>	2507
X2CrNiMoCuN25-6-3	14.507	255

El acero inoxidable dúplex es bastante reciente y sus derivados son menores que en el resto de los tipos de acero, aquí se pueden encontrar los principales grados usados actualmente.

En la figura inferior se puede observar, como de un grado base se elaboran el resto de los grados, con la adición de elementos o su supresión.

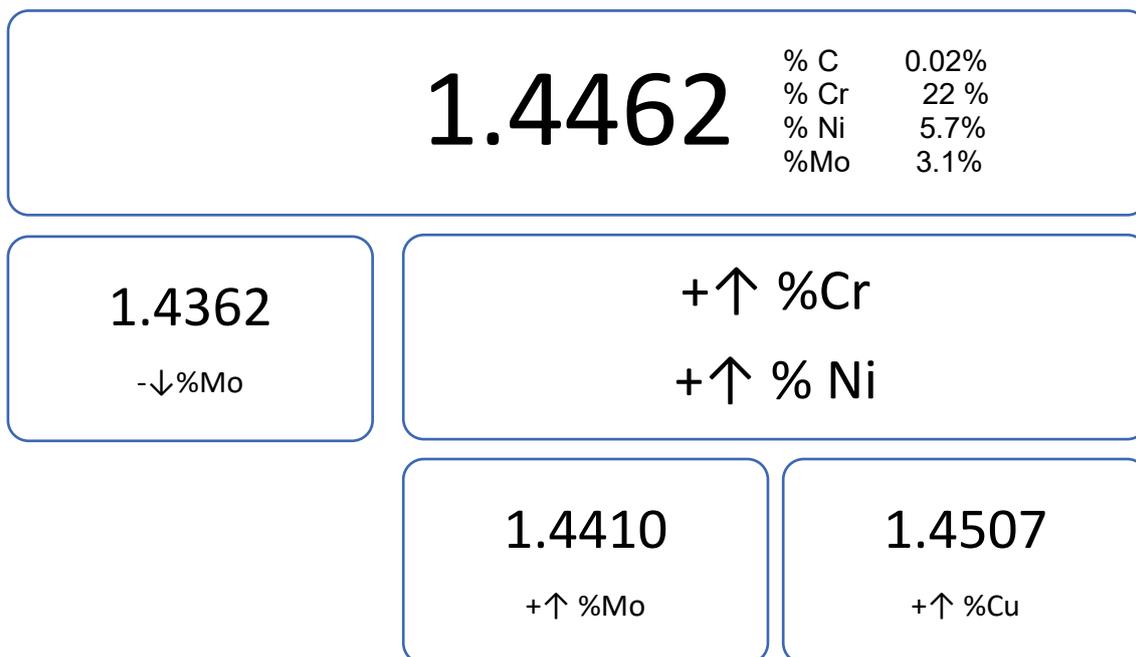


Figura I.25 Principales aceros inoxidables dúplex derivado del tipo 1.4462

#### 4.1.5 Elementos aleantes en aceros inoxidables:

Los elementos aleantes se adicionan en las composiciones químicas para mejorar propiedades, como puedan ser las propiedades mecánicas dúctiles o resistentes, para mejorar la aleación frente a los efectos de la soldadura, la conformabilidad, incrementando la estabilidad de la austenita a temperatura ambiente (elementos gammágenos) o de la ferrita (elementos alfégenos), algunos de los componentes principales del acero inoxidable y su función dentro de la aleación son:

1. **Hierro (Fe):** es el principal componente del acero inoxidable y proporciona resistencia mecánica y durabilidad.
2. **Carbono (C):** Elemento gammágeno muy fuerte, estabiliza la austenita en la deformación frío, puede formar carburos de cromo intergranulares.
3. **Cromo (Cr):** es el elemento clave que le da al acero inoxidable su resistencia a la corrosión. El cromo forma una capa de óxido en la superficie del acero inoxidable, lo que lo protege de la oxidación y la corrosión. contenido mínimo de 12%; contenido típico 18%; efecto alfégeno; a más Cr más resistencia a corrosión, excepto en medio sulfúricos, y resistencia a la oxidación con calor.
4. **Níquel (Ni):** efecto fuertemente gammágeno; mejora la ductilidad y deformabilidad; con 18% de Cr se requiere de 8-9% de Ni para obtener 100% austenita; mejora la resistencia a corrosión en presencia de cloruros.
5. **Manganeso (Mn):** elemento gammágeno (excepto si % > 7%), estabiliza la austenita formada a alta T<sup>a</sup>, mejora la resistencia a fisuración en solidificaciones rápidas
6. **Molibdeno (Mo):** elemento alfégeno; mejora la resistencia a corrosión; se usa entre el 0.3 y el 7%; promueve la formación de fases intermetálicas se utiliza en algunos grados de acero inoxidable para mejorar la resistencia a la corrosión en ambientes agresivos, como los ambientes marinos.
7. **Nitrógeno (N):** elemento gammágeno; se usa hasta 0.15%; %>0.15 provoca excesivos nitruros y fragilidad; fuerte incremento de propiedades mecánicas en austeníticos y dúplex, y no disminuye la resistencia a la corrosión
8. **Titanio (Ti), Niobio (Nb):** elementos alfégenos; estabilizadores del C provocando carburos de Ti y Nb en vez de Cr se utiliza en algunos grados de acero inoxidable para mejorar la resistencia a la corrosión y la estabilidad térmica.
9. **Silicio (Si):** incrementa la resistencia a oxidación; favorable para altas temperaturas; incrementa la resistencia frente a ácidos sulfúricos y nítrico a altas concentraciones; disminuye la resistencia a fisuración en caliente

## DIAGRAMA DE SCHAEFFLER

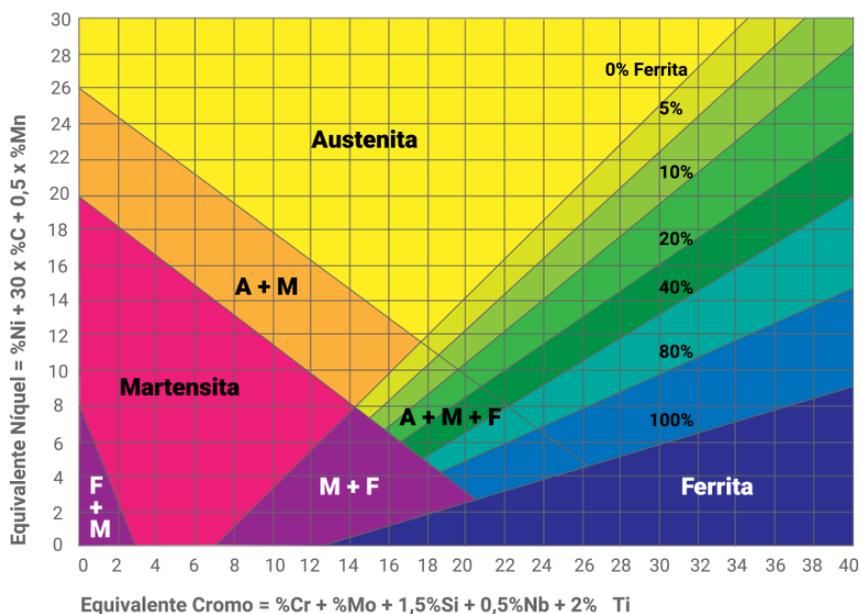


Figura I.26 Diagrama de Schaeffler.

El diagrama de Schaeffler, es comúnmente utilizado en los aceros inoxidables cuando se quiere predecir el tipo de estructura y componentes que va a presentar un grado de acero inoxidable tras un proceso de soldadura con aporte de diferente material al material base soldado, aunque también es muy útil cuando se quiere saber qué tipo de componentes presenta un acero inoxidable. Este utiliza dos elementos equivalentes. El Cromo y el níquel equivalentes, son dos fórmulas donde se introduce el porcentaje de los elementos que tienen el mismo efecto que el cromo en la composición química y los elementos que tienen el mismo efecto que el níquel, con la resultante haciendo una combinación de eje de ordenadas  $Ni_{eq}$  con el de abscisas  $Cr_{eq}$ , se tiene una orientación de la estructura que presenta el material.

### 4.2 El proceso de obtención del acero inoxidable.

A grandes rasgos el proceso de obtención del acero inoxidable es similar al del acero al carbono presentando ligeras diferencias en las etapas de la laminación en caliente y la laminación en frío, debido a que se necesitan controlar parámetros de proceso con mayor precisión que en el acero al carbono.

La materia prima utilizada en la elaboración del acero inoxidable es más de un 85% proviene de chatarra, como se comenta en el *handbook de Outokumpu*, esta chatarra pasa unos rigurosos controles de calidad, para asegurar un buen comportamiento de la colada, y evitar que se utilicen materiales con cargas radiactivas que puedan generar un grave problema medioambiental y de salud.

Esa chatarra junto con otros materiales, como son los ferrocromos y elementos puros es introducida de un horno eléctrico.

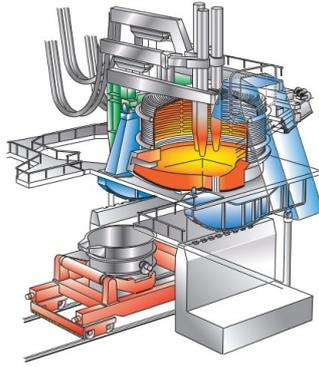


Figura I.27 Ilustración esquemática del horco eléctrico de arco. *Handbook Outokumpu*.

Dentro del proceso de la colada en la acería, esta se puede resumir en 5 subetapas:

1. Material de partida: chatarra y/o ferrocromo
2. Pre calentamiento de la chatarra para eliminación de la humedad
3. Fusión en horno (BOF o HEA) con los fundentes a 1600°C
4. Metalurgia de cuchara, es donde se transporta el acero fundido al convertidos para afinar de la composición
5. Colada en continuo y solidificación en slabs

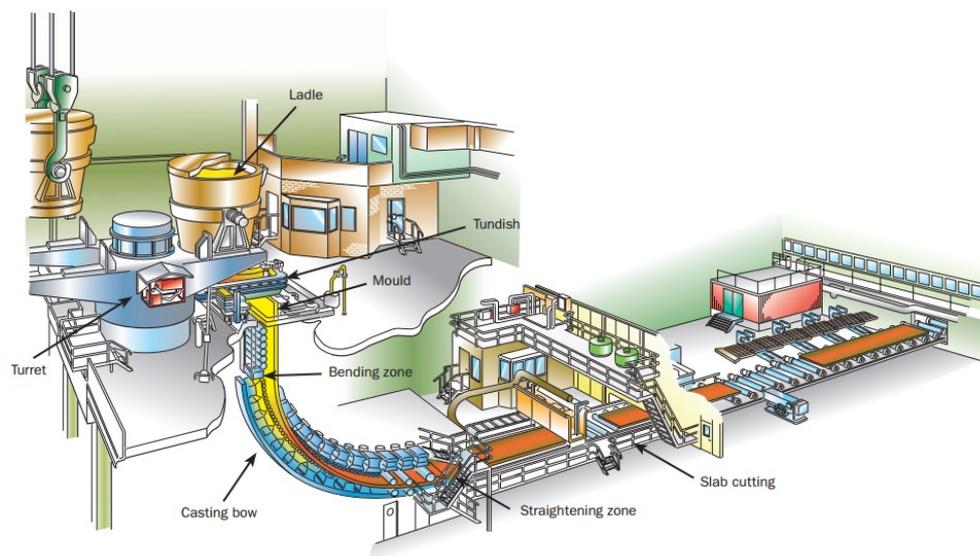


Figura I.28 Ilustración esquemática de máquina de colada continua. *Outokumpu Handbook*.

Una vez el material ha pasado por esta etapa ya se ha obtenido el *slabs* que será utilizado en el siguiente proceso la laminación en caliente.

En esta etapa se transforma el *slab* en un producto plano, para ello se comienza por,

1. Calentamiento del *slab* hasta 1250°C aprox.
2. Laminado previo del *slab* para reducir el espesor hasta 25mm como máximo

3. Laminación continua en tren *Steckel* hasta la bobina final
4. Tratamiento térmico de recocido "*Anneling*"
5. Decapado y pasivado (acabado 1D)

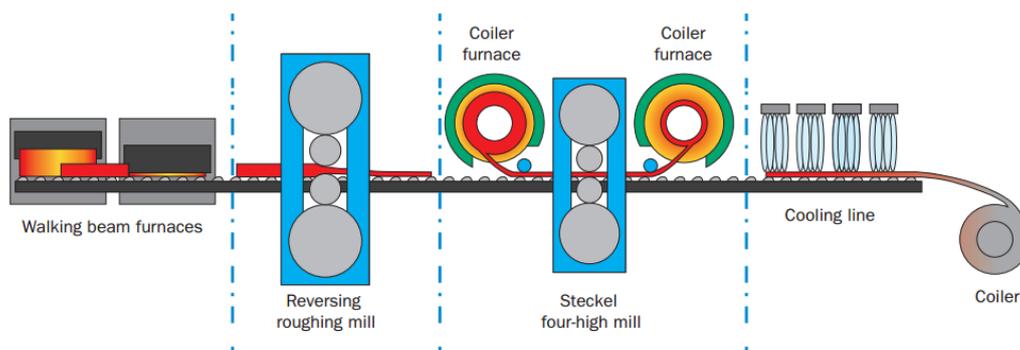


Figura I.29 Ilustración esquemática de la línea completa de trenes de laminación *Steckel*

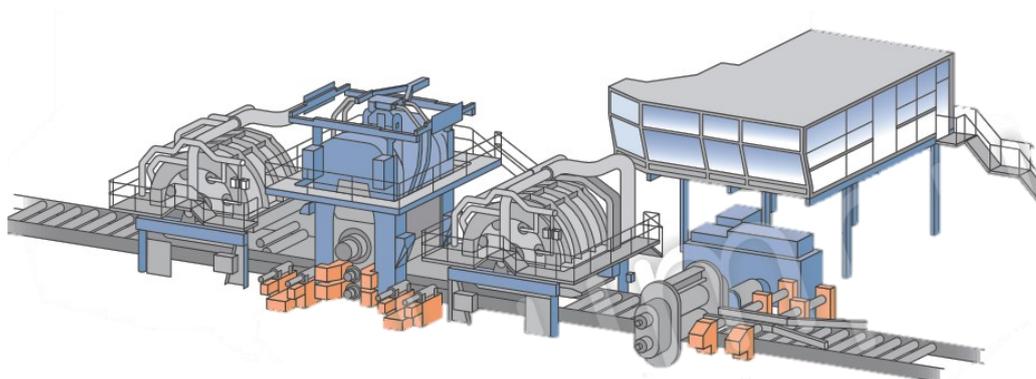


Figura I.30 ilustración esquemática de un tren de laminación *Steckel*

Una vez llegado a esta etapa el material se puede utilizar como producto para proceso o puede seguir la ruta de procesado, donde iría a la laminación en frío,

1. Laminado en frío
2. Tratamiento térmico de recocido
3. Decapado/granallado (limpieza; los puntos 11, 12 y 13 son cíclicos tantas veces como se precise)
4. Acabados finales (2B, 3E, etc)

En esta etapa también hay diferencias en comparación con el acero al carbono y es el tipo de laminador acabador, en este caso se utiliza un laminador *Sendzimir*, este está compuesto por 20 rodillos, 10 en cada parte.

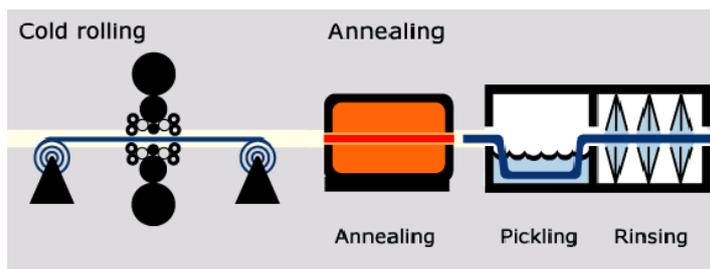


Figura I.31 ruta de laminación en frío.



## **II. OBJETIVOS**



# 1. Objetivos

El objeto de este estudio es tener una mejor comprensión y predicción de los fenómenos ocurridos en el proceso de soldadura de los materiales inoxidables ferríticos estabilizados mediante técnicas de soldadura láser para tubos fabricados en continuo.

Estos materiales presentan fenómenos no entendidos hasta el momento. En los que tras el procesado del material habiendo sido soldado en continuo, y expuesto seguidamente a un ensayo mecánico de deformación, el material colapsa por la soldadura, pero transcurridas 24 horas ese mismo material soporta el esfuerzo mecánico.

Este tipo de fenómenos genera incertidumbre en los procesos de producción de tubo soldado en continuo, con este estudio se busca por una parte aumentar la comprensión de estos materiales “relativamente nuevos”, y tener una mejor predicción del comportamiento de estos ante la soldadura, para así reducir las incertidumbres en los procesos de soldadura, fijando un método operativo que garantice la correcta calidad de la soldadura sin incertidumbres.

- El primer reto es reducir los problemas de producto no conforme que se generan en la fabricación de tubo y acortar el tiempo de puesta en marcha del proceso.
- El segundo es reducir las incidencias de cliente, por fallos en la soldadura.
- El tercer reto es entender los mecanismos que se da en un acero inoxidable ferrítico mediante en su proceso de soldadura mediante técnicas láser, en la fabricación de tubos en continuo.
- El cuarto reto consiste en plantear soluciones operativas en proceso para garantizar el 100% de la soldadura conforme.

## 2. Planificación

trabajo se organiza en 5 fases que, al seguir una secuencia lógica basada en la satisfacción de objetivos parciales, permitirá obtener los objetivos específicos generales indicados en el apartado anterior. Independientemente de que previa a la propuesta de proyecto se ha realizado una completa revisión bibliográfica, esta actividad se profundizará y actualizará con la obtención de la información más reciente que se puede conseguir mediante el uso de los métodos electrónicos actualmente disponibles. Destacar la importancia de la revisión bibliográfica de forma periódica como sistema de retroalimentación al proyecto.

### **Fase 1.-Obtención de probetas y testigos de ensayo en materia prima.**

En esta primera fase, se hará una preselección del material a utilizar en las sucesivas fases, El material empleado será de diferentes fuentes, para tener una mejor comparativa, y poder realizar una mejor caracterización. En esta línea se van a realizar diferentes ensayos, entre los que cabe destacar, los ensayos mecánicos de tracción, y, micro durezas además de análisis químico, y análisis micrográfico para obtener la morfología de las diferentes estructuras presentes en este tipo de materiales, conocer grado de perfeccionamiento de la estructura e impurezas y partículas malignas que puedan afectar en el proceso de soldadura.

### **Fase 2.-Preparación probetas ensayo en tubo.**

Pretende obtener los parámetros que intervienen en el proceso de soldadura y ver cómo influyen estos en las propiedades mecánicas finales y en el cambio de la morfología de la estructura, obtenidas tras ella.

Con ello se buscan unos valores de referencia en cuanto a las características mecánicas, y en la propia tecnología del proceso, que serán de utilidad para las sucesivas fases del proyecto.

Las probetas se obtendrán de la fabricación de tubo redondo en una línea de perfilado y soldado mediante tecnología láser.

### **Fase 3.-Realización de ensayos de las probetas.**

Llegados a esta fase, se pretende obtener una caracterización completa de los distintos materiales empleados en las probetas. Se van a realizar ensayos de tracción bajo norma, donde se va a someter a la zona soldada a cargas, y se observará su comportamiento. Se les realizará un análisis de ensayos no destructivos en continuo de la fabricación, para verificar la continuidad de la soldadura. Y se harán diferentes análisis micrográficos, de la zona soldada y alrededores. Con ello se busca conocer la zona de afección térmica, y la estructura predominante tras este proceso de soldadura, ver la cantidad de precipitados que se forman, y conocer su naturaleza y propiedades. En definitiva, conocer los fenómenos físicos y químicos que se producen antes de la soldadura, en la soldadura, y tras ella.

#### **Fase 4.- Análisis y estudio de los datos.**

Obtención el patrón de transformaciones que se dan en los procesos de soldadura, para ello se realizará un análisis profundo y en detalle de todos los aspectos ensayados en la fase 3, las diferentes configuraciones del proceso, y cómo influyen estas sobre la soldadura, para plantear la hipótesis de sucesos y corroborarla o no en la etapa final de conclusiones.

#### **Fase 5.- Conclusiones.**

En este momento, se busca resumir todos los resultados obtenidos, y ver si los resultados dan como resultado un patrón similar de sucesos y reacciones que validen la hipótesis de sucesos.



### **III. EXPERIMENTAL**



## 1. Técnicas experimentales

Son diversas las técnicas utilizadas para la caracterización de los materiales metálicos, entre ellas se pueden distinguir:

- Caracterización mecánica.
- Caracterización química.
- Caracterización estructural.

Dentro de las técnicas para la caracterización mecánica, la más utilizada es el ensayo de tracción debido a la información que aporta con tan sólo un ensayo. Además de ser la de mayor uso y más entendida.

### 1.1 Ensayos de caracterización mecánica.

- **Ensayo de tracción:**

El ensayo de tracción persigue conocer las propiedades resistentes de un material frente a un esfuerzo, este esfuerzo pretende estirar la probeta. Según la definición de la norma UNE-EN ISO 6892-1 (Materiales metálicos. Ensayos de tracción)

cita: ***“el ensayo implica tensionar una muestra de ensayo de tracción, generalmente hasta su fractura, con el propósito de determinar una o más de las propiedades mecánicas...”***

La información que aporta el ensayo de tracción es muy completa ya que permite cuantificar la respuesta elástica y plástica del material a través de sus propiedades resistentes (módulo elástico o de Young y tensión de rotura) y dúctiles (% de alargamiento a la rotura). Las formas de trabajo en un ensayo de tracción son múltiples permitiendo incluso trabajar en condiciones de fatiga. Lo habitual es realizar un control por carrera, es decir estableciendo una velocidad constante de separación de las mordazas, aunque algunos equipos también permiten trabajar con un control por fuerza manteniendo una velocidad de incremento de fuerza constante a lo largo de todo el ensayo.

El área encerrada bajo el ensayo de tracción es útil para estimar la tenacidad de un material, entendida como el trabajo o energía que consume un material en el proceso de deformación y fractura.

Para la realización de los ensayos de tracción se ha empleado una máquina universal electromecánica modelo EUROTRES 500 de Ibertest.

El software utilizado para la representación de los datos ha sido el Wintest.

Los parámetros que se han obtenido del ensayo han sido:

- Resistencia a rotura en MPa ( $R_m$ )
- Límite elástico MPa ( $R_e$ ,  $R_{p0.2}$ )

- Alargamiento a la rotura (%A)

Tabla III.1 Características técnicas máquina ensayo tracción Eurotest-500

MODELO	EUROTEST 500
Clase según ISO 7500-1	0,5 desde el 0,5% al 100% FS
Capacidad máxima	500 kN
Medida de fuerza	Célula de carga universal, de bandas extensométricas en puente completo
Resolución de fuerza	0,0001 kN
Repetibilidad de la célula de carga	0,025%
Luz libre horizontal	720 mm
Luz libre vertical, distancia entre cabezales de tracción estándar	Ajustable de 0 a 1400 mm
Velocidad del desplazamiento	Entre 0,001 y 500,00 mm/min



Figura III.1 Máquina ensayo Ibertest modelo Eurotest-500 (Flinsa)

- **Ensayo de Micro durezas:**

La dureza se utiliza para medir cual es la oposición de un material a ser penetrado o rayado por otro, en una zona localizada y concreta. Esta está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas del material.

Esta técnica es una combinación de microscopia y ensayo de dureza, se necesita el microscopio debido a que se está trabajando a nivel de tamaño de grano y la muestra tratada metalográfica mente para poder observar la zona del material donde se quiere aplicar dureza.

El fundamento es el mismo que el ensayo de dureza a escala macroscópica, donde se utiliza un elemento penetrante (penetrador de punta de diamante con forma de pirámide invertida con un ángulo entre caras de 136°) que será cargado con una masa a determinar en función del tipo de material en ensayar, durante un tiempo concreto. Esto deja una huella que será medida,

El cálculo de la microdureza Vickers se realiza mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$H_{mV} = \frac{P}{S} (Kg/mm^2) = 1854,36 \frac{P(g)}{d^2(\mu^2)}$$

P = masa de la pesa en g.

d = dimensión de la diagonal en  $\mu m$ .

- Carga utilizada: 50g
- Tiempo de permanencia de la carga: 15s

Marca: Shimadzu, modelo A106



Figura III.2 Micro durómetro Shimadzu (UPV-Alcoy)

## 1.2 Ensayos caracterización química.

- Espectrometría de emisión óptica (EOP):

Técnica analítica utilizada para medir la composición elemental de metales y aleaciones. Se le conoce como chispa OES, ya que las chispas se utilizan para eliminar el material de la superficie de las muestras de metal para que pueda producir emisiones ópticas características.

Esta técnica utiliza un salto eléctrico de alto voltaje entre la muestra y un electrodo para desprender los elementos de la muestra, aquí se genera un plasma y los átomos e iones contenidos en el vapor atómico se excitan en la emisión de radiación. La radiación emitida se pasa a la óptica del espectrómetro (OES) directamente a través de una fibra óptica, donde se dispersa en sus componentes espectrales. Del rango de longitudes de onda emitidas por cada elemento, se mide la línea más adecuada para la aplicación mediante un CCD (dispositivo de acoplamiento de carga) o PMT (tubos fotomultiplicadores).

La intensidad de la radiación, que es proporcional a la concentración del elemento en la muestra, se vuelve a calcular internamente a partir de un conjunto almacenado de curvas de calibración y se puede mostrar directamente como porcentaje de concentración.

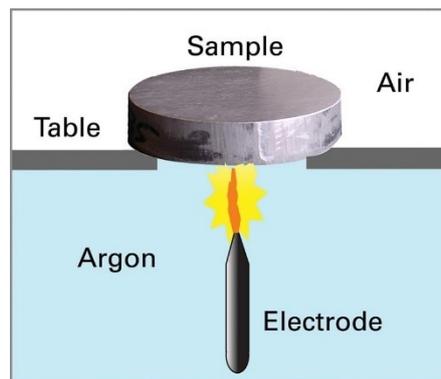


Figura III.3 Esquema de disposición muestra - salto de chispa. Thermofisher.

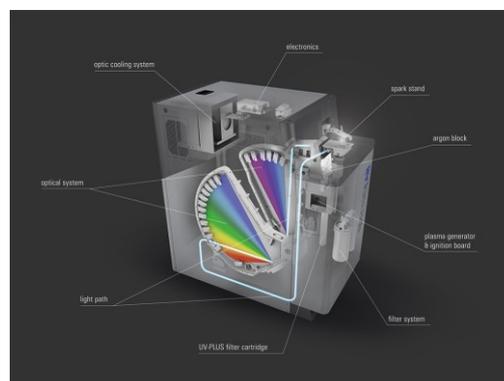


Figura III.4 Esquema dispositivo Espectrolab. Espectro.



Figura III.5 Máquina Spectro utilizada. Flinsa

### 1.3 Análisis metalográfico.

Técnica utilizada para la observación de la estructura interna de un material metálico, donde se pueden identificar los diferentes constituyentes a través de la observación de la superficie de una probeta tratada, con la ayuda de un microscopio óptico o electrónico.

Cada material contiene un gran número de millones de características microestructurales por centímetro cúbico y estas características influyen fuertemente en las propiedades del material. Las características microestructurales pueden existir en tamaños de al menos diez órdenes de magnitud, por ello hay diferentes instrumentos hoy en día que visualizan casi todas las funciones de esta gama, el uso de estos instrumentos vendrá condicionado en función del tamaño que se pretenda observar.

Gracias a esta técnica se pueden observar, diversos compuestos y fases, diferentes formas y tamaños que adoptan los elementos en la estructura interna de un material, y la distribución y configuración entre las fases y sus compuestos.

- Lupa digital.

Equipo utilizado para la observación de probetas con hasta 300 aumentos, fácil de usar por su poca dificultad para configurar, y con una herramienta de captura de imagen que permite hacer mediciones, el software utilizado es Microcapture Pro.



Figura III.6 Lupa digital.

---

### Características lupa

---

Resolución: 5 megapixel (2592 x 1944 pixels)

---

Tipo de sensor: CMOS

---

Magnificación: 10-300X

---

Video: 30 fps at VGA resolution (640 x 480)

---

Rango de focalización: 10-150 mm

---

Fuente de luz: 8 LEDs with adjustable brightness

---

USB Longitud cable: 2 m

---

- Microscopio óptico.

Equipo para la observación de las muestras metalográficas, muestra la imagen ampliada de una zona concreta de examen. Utiliza un haz de luz horizontal, de alguna fuente de luz, este es reflejado por medio de un reflector de vidrio plano, hacia abajo a través del objetivo del microscopio sobre la superficie de la muestra. Un poco de esta luz incidente reflejada desde la superficie de la muestra se amplificará al pasar a través del sistema inferior de lentes, el objetivo, y continuará hacia arriba a través del reflector de vidrio plano; luego, una vez más lo amplificará el sistema superior de lentes, el ocular. El poder de resolución de un microscopio óptico alcanza una resolución máxima de  $0,15\mu\text{m}$ .



Figura III.7 Microscopio óptico

- Microscopia electrónica de barrido.



Figura III.8 Microscopio electrónico de barrido

El microscopio electrónico de barrido (SEM) es un instrumento capaz de ofrecer un variado rango de informaciones procedentes de la superficie de la muestra. Su funcionamiento se basa en barrer un haz de electrones sobre un área del tamaño que deseemos (aumentos) mientras en un monitor se visualiza la información que hayamos seleccionado en función de los detectores que haya disponibles.

Detector de rayos X (EDS): es el que recibe los rayos X procedentes de cada uno de los puntos de la superficie sobre los que pasa el haz de electrones. Como la energía de cada rayo X es característica de cada elemento, podemos obtener información analítica cualitativa y cuantitativa de áreas del tamaño que deseemos de la superficie. Por ello se conoce esta técnica como Microanálisis por EDS.

#### 1.4 Procedimiento preparación de probetas metalográficas.

**Etapa 1:** selección del material a ensayar, puesto que en este trabajo se persigue el estudio de la soldadura de los aceros inoxidable ferríticos grados 1.4509, 1.4510 y 1.4512, lo primero que se ha escogido ha sido de una parte la materia prima y de otra el tubo soldado.

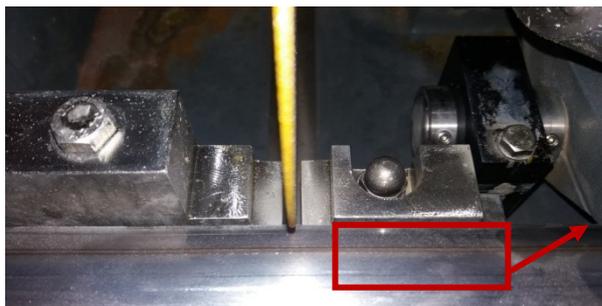


Figura III.9 Selección de la bobina (materia prima)



Figura III.10 Elección del tubo soldado

Una vez elegido el material se busca la zona de soldadura que interese para el estudio.



Zona marcada para su análisis metalográfico.

Figura III.11 Selección zona de muestra

**Etapa 2:** una vez elegida la zona se comienza con la preparación de la probeta, donde se ha procedido a cortar un pequeño trozo de la soldadura en la máquina tronzadora, esta está refrigerada con agua, ya que un calentamiento excesivo del material en el momento del corte va a provocar un cambio en la estructura del material cosa que no es buena, ya que distorsionaría cualquier posible discusión y resultado sobre la estructura.



Figura III.12 Tronzadora metalográfica

**Etapa 3:** aquí continuamos con la preparación de la probeta, como es un elemento muy pequeño de material se utiliza una máquina de embutición, cuya misión es recubrir toda la muestra cortada en la etapa anterior de un material polimérico, para que cuando se pase a la etapa de pulido y limpieza del material se pueda manipular sin riesgo de dañarlo.

Esta máquina utiliza un elemento polimérico que con presión y temperatura funde y recubre por completo el material a estudiar.



Figura III.13 Máquina de embutición



Figura III.14 Pastilla embutida con el material

**Etapa 4:** Esta etapa es bastante importante, ya que dependiendo de la calidad del pulido se podrá observar con mejor o peor calidad la muestra tratada. Para el pulido se utiliza una máquina abrasiva donde se controla por una parte los discos o paños de pulir, de otra la presión de apriete contra los discos de pulido, una solución con diferentes tamaños de partículas ayuda con el pulido, y tiene la misión de refrigerar además de pulir para no quemar la estructura, y por último también se controla el tiempo de este pulido, para ello se adjunta tabla de pulido.

Tabla III.2 Parámetros de pulido

	<b>Esmerilado</b>	<b>Esmerilado fino</b>	<b>Pulido 1</b>	<b>Pulido 2</b>	<b>Pulido 3</b>
<b>Superficie plato</b>	MD-PIANO 220	Md-Allegro	MD-DAC	MD-NAP	MD-CHEM
<b>ABRASVO</b>	-	DIAPRO ALLEGRO / LARGO	DIAPRO DAC	DIAPRO NAP	OP-U
<b>Velocidad (rpm)</b>	500	250	250	250	250
<b>FUERZA</b>	20 N	30 N	40 N	15 N	15 N
<b>Tiempo (min)</b>	4	6	7	4	1 + 30" LIMPIEZA



Figura III.15 .- Máquina de pulir probetas metalográficas



Figura III.16 Imagen tomada a 100X en estado pulido

**Etapas 5:** en el momento se llega a este punto, donde hay que preparar el ataque químico para poder ver la estructura interna del material. Tamaño de granos, distribución, imperfecciones etc.

Para los materiales ferríticos se emplean un ataque Vilella, donde sólo hay que sumergir la probeta durante un tiempo determinado en el preparado ácido para que revele toda la información la probeta.

#### REACTIVO DE VILELLA

##### Composición

5 ml HCl (Ácido clorhídrico), 1 g de ácido pícrico y 100 ml de etanol o metanol

##### Procedimiento de ataque

Por inmersión, tiempo variable, sin excederse más de 1 minuto porque si no se produce el quemado de la superficie y hay que volver a pasar a la etapa de abrasión mecánica para limpiar toda la superficie.

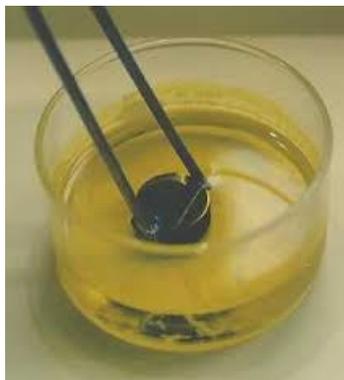


Figura III.17 Probeta siendo atacada con reactivo Vilella.

**Material objeto de ataque**

Aceros y fundiciones de alto contenido en carbono.

**Resultado del ataque**

En los aceros inoxidables ataca la martensita y delinea las fases secundarias (carburos, fase sigma y ferrita delta).

**Información obtenida de**

*ASM Handbook VOLUME 9; METALLOGRAPHY AND MICROSTRUCTURES.*

**Etapa 6:** Esta es la última etapa del procedimiento, en ella se va a observar al microscopio el resultado del ataque químico, y se van a poder apreciar la estructura que presenta la muestra atacada en cuestión.



Figura III.18 Ejemplo de ataque en material 1.4512, 100x, reactivo Villela

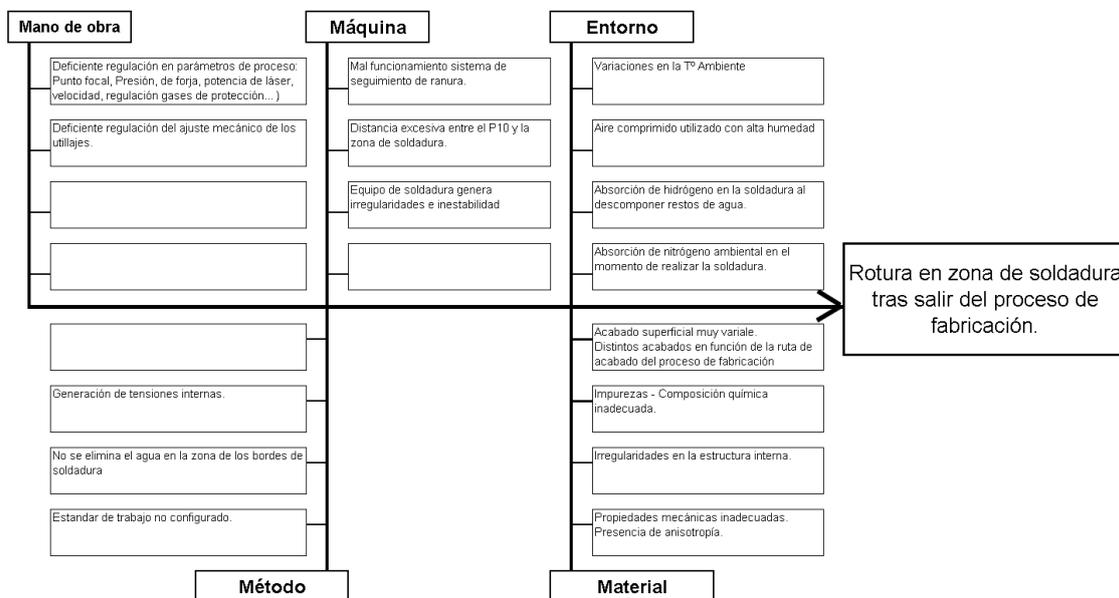


## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**



### 1. Análisis de causas de fallo:

Lo primero que se va a realizar es una exposición de todas las posibles causas que puedan afectar a este fenómeno de rotura en la soldadura, para ello se va a realizar uso del método Ishikawa; donde se analizaran las 5 posibles causas del defecto:



El objetivo de este análisis es poder profundizar en cada una de las causas e ir buscando soluciones a cada situación potencial de fallo, en la gráfica siguiente se puede ver el resumen de cuáles son las posibles causas por cada posible familia de fallo.

Rotura de soldadura aleatorio				
<b>Material</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Propiedades mecánicas.</li> <li>irregularidades en estructura interna.</li> <li>impurezas. composición química</li> <li>Acabado superficial</li> <li>bordes de fleje con rebabas</li> </ul>	<b>Máquina</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Mal funcionamiento sistema seguimiento de ranura</li> <li>distancia excesiva entre P10- zona de soldadura.</li> <li>Equipo de soldadura genera irregularidades</li> <li>Se generan tensiones internas en el conformado del tubo</li> <li>No se elimina adecuadamente el agua de los bordes del tubo.</li> </ul>	<b>Método</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Estandar no configurado correctamente.</li> </ul>	<b>Mano de obra</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Regulación incorrecta de:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Punto focal.</li> <li>Presión rodillos soldadura.</li> <li>Potencia.</li> <li>Velocidad de trabajo.</li> <li>Caudal de gases.</li> </ul> </li> </ul>	<b>Medio</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Tº ambiente</li> <li>Calidad del aire comprimido</li> <li>% de humedad en planta</li> <li>Posibilidad de absorción de nitrógeno, hidrógeno del ambiente por condiciones del momento.</li> </ul>

## 1.1 Análisis materia prima

Rotura de soldadura aleatorio	
<b>Material</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propiedades mecánicas.</li> <li>• irregularidades en estructura interna.</li> <li>• impurezas. composición química</li> <li>• Acabado superficial</li> <li>• bordes de fleje con rebabas</li> </ul>

La primera causa que se va a analizar es la materia prima, para ello se va a realizar un estudio caracterizando al material en función de:

- Composición química.
- Propiedades mecánicas.
- Características microestructurales.

En el siguiente apartado se reflejan los estudios realizados sobre diversos aceros inoxidables, concretamente en su designación bajo Norma Europea el EN 1.4509, EN 1.4510 y el EN 1.4512.

Tabla IV.1. Composiciones normalizadas de los aceros inoxidables ferríticos 1.4509, 1.4510, 1.4512.

	EN 1.4509	EN 1.4510	EN 1.4512
<b>C</b>	≤0.030	≤0.050	≤0.030
<b>Si</b>	≤1.00	≤1.00	≤0.75
<b>Mn</b>	≤1.00	≤1.00	≤0.80
<b>P</b>	≤0.040	≤0.040	≤0.040
<b>S</b>	≤0.015	≤0.015	≤0.015
<b>Cr</b>	17.50 – 18.50	16.00 – 18.00	10.50 – 12.25
<b>Ni</b>			
<b>Mb</b>			
<b>Ti</b>	≥0.10	≥0.2+4 (C+N)	≥6 (C+N)
<b>Cu</b>			
<b>Nb</b>	0.30 – 1.20		

Previo a cualquier estudio es conveniente consultar la norma específica para conocer la composición de cada uno de los aceros anteriormente mencionados, la Tabla IV.1 presenta la cantidad de cada uno de los elementos para cada uno de los aceros a analizar.

### 1.1.1 Codificación de las muestras

Con el fin, de facilitar la identificación de las diferentes muestras, éstas se han codificado siguiendo el siguiente código estándar de flinsa, el cual queda reflejado a continuación:

- AC1 1.4509; AC1 1.4510; AC1 1.4512
- AC2 1.4509; AC2 1.4510; AC2 1.4512
- AC3 1.4509; AC3 1.4510; AC3 1.4512

Para llevar a cabo la caracterización de la composición de cada una de las muestras recogidas de diferentes siderúrgias se han realizado cuatro etapas:

- Preparación de muestras.
- Observación de la microestructura.
- Obtención de valores de microdureza.
- Análisis de composición.

### 1.1.2 Preparación de las muestras

La observación de la microestructura requiere de la preparación metalográfica de las diversas muestras a analizar, el proceso de preparación se inicia con la elección de un trozo de las muestras de aproximadamente 1 cm<sup>2</sup>, el cual sea representativo del material. Para cumplir tal fin, se procede a cortar mediante cizalla, un trozo de la parte central de la lámina evitando en todo momento cualquier calentamiento.

Tras la extracción de la muestra representativa, esta es embutida en un soporte de manejo para su fácil manipulación. Para tal fin, se ha elegido la embutición en frío con el objeto de preservar las propiedades de la muestra mediante el uso de resina de epoxi transparente. En el mismo proceso de embutición las muestras quedan codificadas mediante un papel embebido en el interior de la resina, siguiendo el código anteriormente mencionado.

Finalizada la etapa de embutición se procede al desbaste refrigerado de la superficie con un gramaje de P240 para finalizar con un papel de gramaje P1200. Finalizada la etapa de desbaste, las muestras han sido pulidas con un paño de pelo corto haciendo uso de pasta de diamante con un tamaño de partícula de 1 micra.

Tras el pulido se ha procedido a la aplicación de la disolución ácida (Vilella) con el fin de revelar la microestructura correspondiente a cada una de las muestras.

### 1.1.3 Observación de la Microestructura.

La aplicación del ataque químico permite observar la microestructura de cada uno de los aceros analizados.

A priori y conociendo los tipos de acero a analizar, aceros ferríticos, la microestructura que se visualizará corresponderá a una estructura completamente ferrítica.

El estudio y análisis de las microestructuras obtenidas se inicia con la muestra AC1 – 1.4509. La microestructura que presenta esta muestra se caracteriza por granos de carácter equiaxial con el borde claramente definido. El tamaño de los granos es variable con dimensiones radiales de  $0.552 \pm 0.050$  mm.

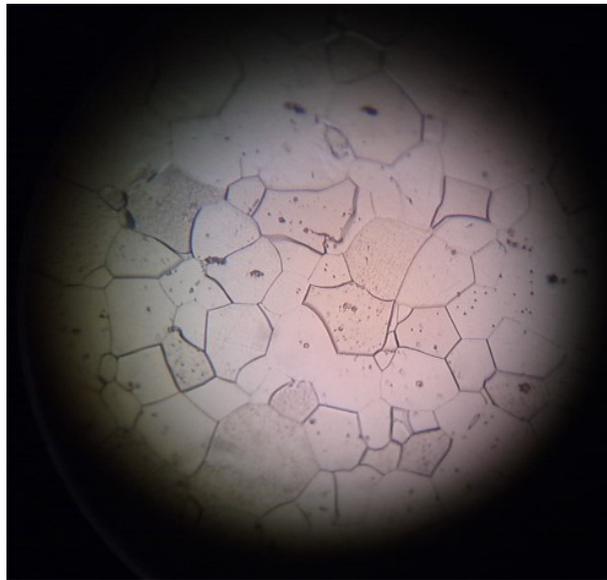


Figura IV.1 Micrografía correspondiente al acero 1.4509 suministrado por AC1.

Al igual que en el caso anterior, la muestra correspondiente al AC1 – 1.4510 presenta una estructura equiaxial con tamaños de  $0.534 \pm 0.126$  mm.

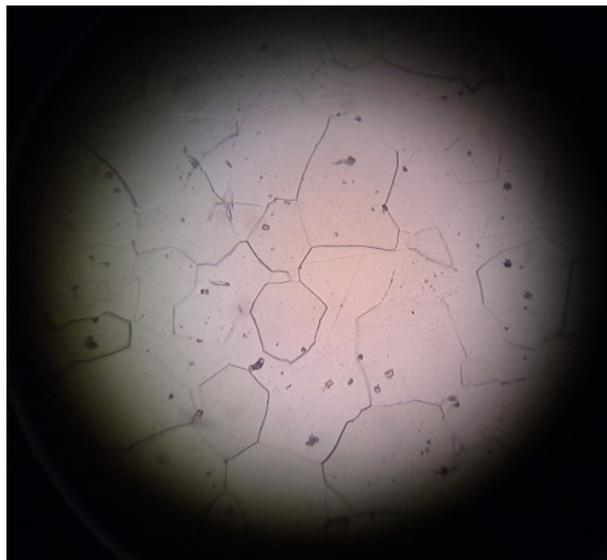


Figura IV.2 . Micrografía correspondiente al acero 1.4510 suministrado por AC1.

En el estudio metalográfico correspondiente a la tercera muestra suministrada por AC1, se observa al igual que en el resto de las muestras analizadas anteriormente una estructura granular de tipo equiaxial. La diferencia radica en el tamaño del grano, en este caso, la observación a simple vista permite observar la existencia de una estructura granular equiaxial de pequeño tamaño; las mediciones así lo corroboran con valores de  $0.186 \pm 0.039$  mm.

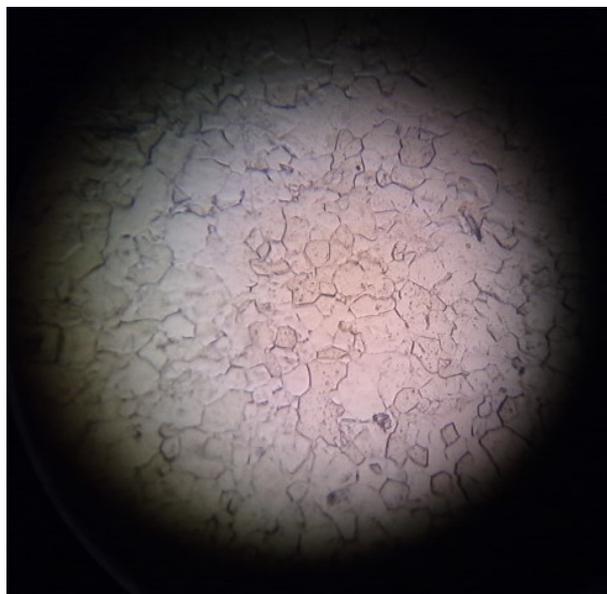


Figura IV.3 . Micrografía correspondiente al acero 1.4512 suministrado por AC1.

Continuando con el estudio se ha procedido al estudio y análisis de las muestras proporcionadas de otros proveedores siderúrgicos. En este caso, la muestra AC2 – 1.4509 no presenta diferencias significativas respecto la muestra AC1 – 1.4509, en ambos casos la presencia de grano equiaxial es indudable y con un tamaño de grano muy semejante,  $0.426 \pm 0.039$  mm.

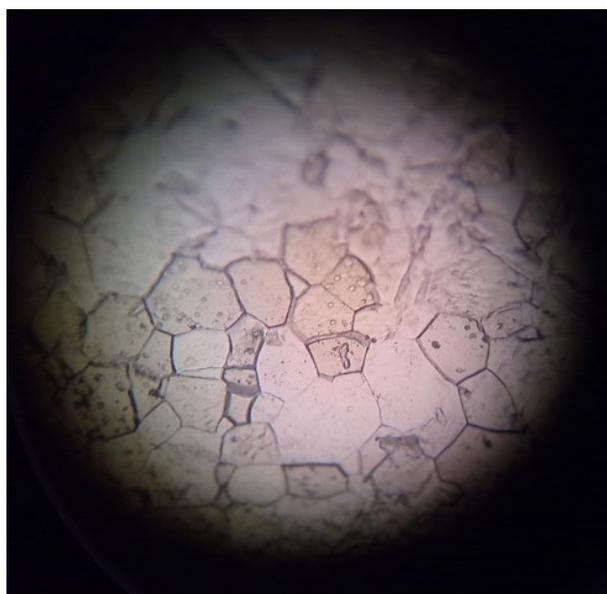


Figura IV.4 Micrografía correspondiente al acero 1.4509 suministrado por AC2.

Al igual que en el caso anterior, las muestras 1.4510 ( $0.42 \pm 0.12$  mm) y 1.4512 suministradas por AC2 no presentan diferencias en cuanto a su microestructura, en ambos casos, es observable la presencia de granos de tipo equiaxial con un tamaño menor en las muestras correspondientes al acero 1.4512 ( $0.144 \pm 0.039$  mm).

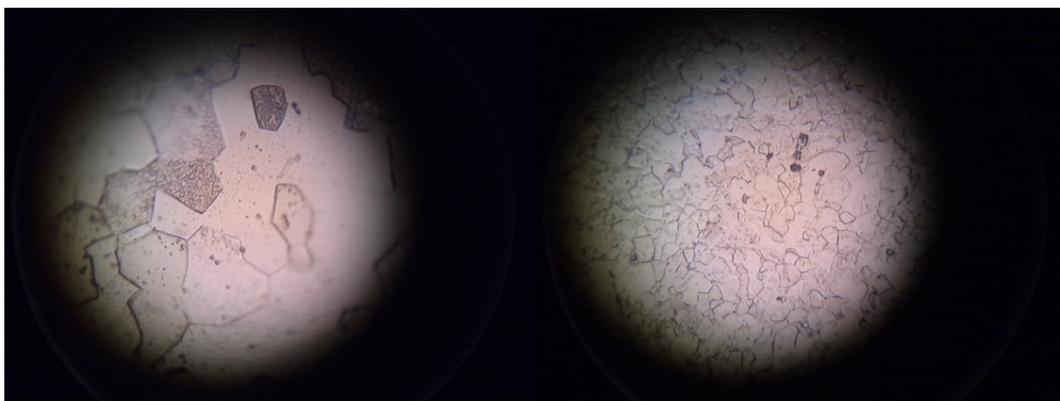


Figura IV.5 . Micrografías correspondientes al acero 1.4510 (izq) y al acero 1.4512 (der) suministrado por AC2.

Finalmente, y al igual que en las muestras anteriores se ha procedido al estudio y análisis de las muestras suministradas por AC3. En este caso, la estructura equiaxial con escasa variación de tamaño se repite para la muestra AC3 – 1.4509, los tamaños medios para este caso son de  $0.312 \pm 0.100$  mm.

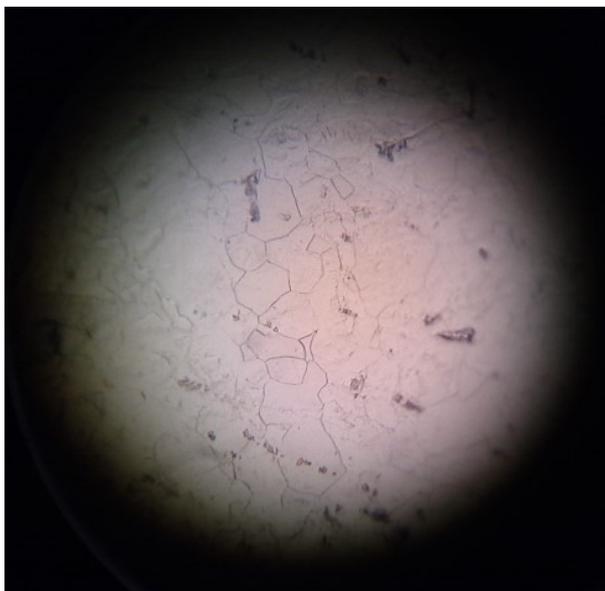


Figura IV.6 . Micrografía correspondiente al acero 1.4509 suministrado por AC3.

La imagen de la microestructura del acero 1.4510 del suministrador AC3 muestra un tamaño de grano ligeramente mayor a la muestra 1.4509. Los tamaños en este caso son de  $0.408 \pm 0.103$  mm.



Figura IV.7 . Micrografía correspondiente al acero 1.4510 suministrado por AC3.

Finalmente, la muestra AC3 – 1.4512 se caracteriza por granos equiaxiales de gran tamaño, incluso mayores que los presentes en el resto de los aceros analizados. El tamaño de estos tiene una dimensión media de  $0.738 \pm 0.115$  mm.

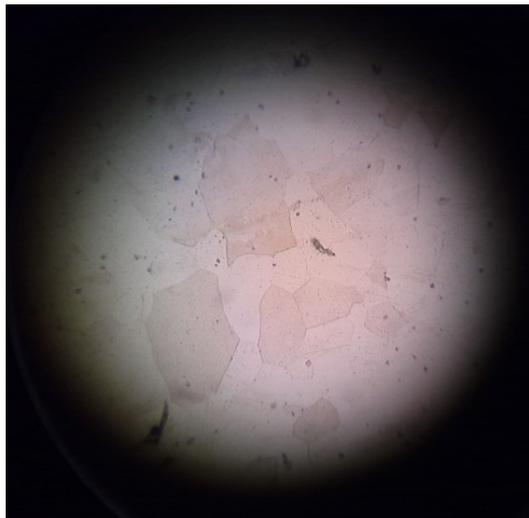


Figura IV.8 Micrografía correspondiente al acero 1.4512 suministrado por AC3.

La tabla adjunta muestra las dimensiones obtenidas en las diversas muestras analizadas.

Tabla IV.2. Comparativa de las dimensiones obtenidas en los diferentes aceros y suministradores.

Suministrador	Código de Acero	Longitud radial, mm	Desviación
<b>AC1</b>	1.4509	0.552	0.050
	1.4510	0.534	0.126
	1.4512	0.186	0.039
<b>AC2</b>	1.4509	0.426	0.039
	1.4510	0.420	0.120
	1.4512	0.144	0.039
<b>AC3</b>	1.4509	0.312	0.100
	1.4510	0.408	0.103
	1.4512	0.738	0.115

Tras el análisis de las microestructuras se puede concluir lo siguiente. Los granos presentan tamaños que van desde 0.144 mm (dimensión radial) hasta alcanzar valores de 0.738 mm. Las diferencias más significativas se encuentran en las muestras del suministrador AC3, donde el tamaño de grano es diferente en cada una de las calidades aportadas, destacando el gran tamaño que presenta el grano de la calidad 1.4512. Por otro lado, los suministradores AC1 y AC2 muestran tamaños granulares muy similares entre sí, a excepción de las estructuras granulares correspondientes al acero 1.4512, las cuales presentan tamaños de grano muy pequeños.

Por todo ello, y sabiendo que el tamaño influye en el comportamiento mecánico del material, no es aconsejable el uso de aceros con tamaños de grano excesivamente pequeños, así como aceros con microestructuras granulares de gran tamaño.

#### 1.1.4 Obtención de los Valores de Microdureza.

La microdureza ha sido obtenida haciendo uso de la escala Vickers, la cual utiliza un penetrador de punta de diamante con forma de pirámide invertida con un ángulo entre caras de 136°. El cálculo de la microdureza Vickers se realiza mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$H_{mV} = \frac{P}{S} (Kg/mm^2) = 1854,36 \frac{P(g)}{d^2(\mu^2)}$$

Se han realizado cinco mediciones de distintas zonas de la muestra preparada metalográficamente. La tabla muestra los resultados obtenidos de la aplicación de la microdureza sobre las diversas muestras aportadas por la empresa.

Las condiciones para la realización de las mediciones de la microdureza han sido las siguientes:

- Peso utilizado 50 gramos.
- Tiempo de permanencia de la carga 15 segundos.

Tabla IV.3. Valores de microdureza de los diferentes aceros suministrados.

Código - Tipo de Acero	Diagonal de la huella, $\mu\text{m}$					Media, $\mu\text{m}$	HmV
	1	2	3	4	5		
<b>AC1 – 1.4509</b>	24,5	20	23,5	22	22	22,4	184,79
<b>AC1 – 1.4510</b>	24	25	25	26	22	24,4	155,74
<b>AC1 – 1.4512</b>	20	21	21,5	20	22	20,9	212,27
<b>AC2 – 1.4509</b>	18	20	18	20	18	18,8	262,34
<b>AC2 – 1.4510</b>	17,5	25	19,5	24	18	20,8	214,31
<b>AC2 – 1.4512</b>	13,5	21	16	18	18	17,3	309,80
<b>AC3 – 1.4509</b>	20	21	21	21,5	22	21,1	208,26
<b>AC3 – 1.4510</b>	19,5	26	22,5	25,5	22	23,1	177,24
<b>AC3 – 1.4512</b>	22,5	22,5	22,5	22	23	22,5	183,15

### 1.1.5 Análisis de Composición

Para el análisis de composición se ha utilizado la microscopía electrónica de Barrido de emisión de campo con detector de energía dispersiva de rayos X (FESEM). La técnica permite obtener una detallada información de la superficie de la muestra. El haz de electrones barre la superficie de la muestra a la vez que el monitor muestra la información que se haya seleccionado en función del detector elegido.

En este caso, El detector de energía dispersiva de Rayos X, EDS, permite conocer información analítica cualitativa y cuantitativa de la superficie.

Con el fin de obtener valores representativos de las muestras, se han analizado tres zonas en cada una de las superficies.

#### AC1

##### AC1-1.4509

La técnica de la microscopía electrónica de barrido permite visualizar con mayor calidad la microestructura de la superficie. En este caso, podemos observar una estructura equiaxial con la presencia de precipitados en el interior del grano. La composición de los precipitados es determinada mediante los mapas de distribución de los elementos de análisis, pudiendo identificar en este caso precipitados de Ti y Nb.

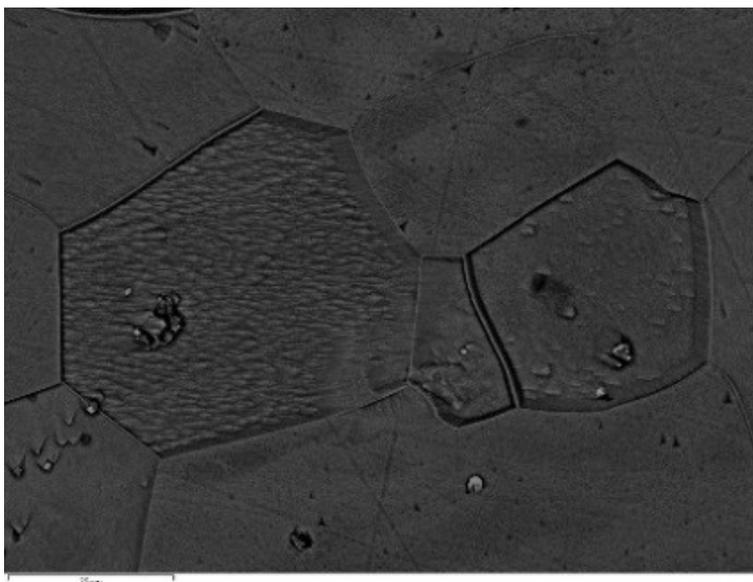


Figura IV.9 Imagen SEM de retrodispersados del acero AC1 - 1.4509.



Figura IV.10 . Distribución de elementos aleantes en el acero AC1 - 1.4509, izq Titanio, der Niobio

El uso del detector de energía dispersiva de Rayos X, EDS, permite conocer la composición y el porcentaje de presencia de este en la superficie de la muestra analizada.

Tabla IV.4. Composición de los elementos aleantes presentes en el acero AC1 – 1.4509.

Elemento	Análisis zona1, %	Análisis zona 2, %	Análisis zona 3, %	Media	desviación
<b>Cr</b>	17,60	17,30	17,50	17,47	0,05
<b>Nb</b>	0,50	0,70	0,50	0,57	0,03
<b>Si</b>	0,40	0,50	0,40	0,43	0,01
<b>Mn</b>	0,30	0,30	0,30	0,30	0,00
<b>Ti</b>	0,20	0,40	0,10	0,23	0,05
<b>P</b>	0,00	0,00	0,10	0,03	0,01

<b>S</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
----------	------	------	------	------	------

**AC1-1.4510**

Siguiendo con el mismo procedimiento que en el caso anterior, las micrografías revelan estructuras de tipo equiaxial en las diversas zonas de análisis. En este caso, un mayor porcentaje de Titanio presente en la muestra provoca la aparición de mayor número de precipitados de Ti distribuidos por las diversas zonas de análisis.

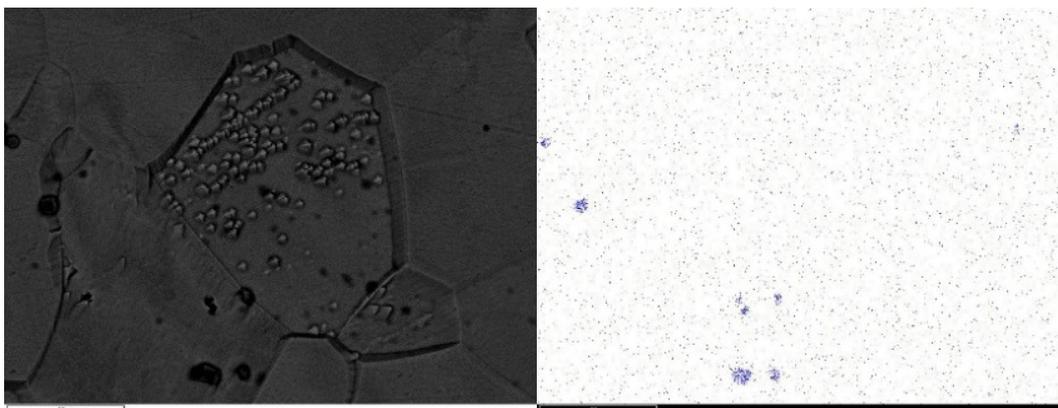


Figura IV.11 . Imagen SEM de retrodispersados (izq) y distribución del Titanio en el acero AC1 - 1.4510.

En lo que respecta a la composición de las zonas analizadas, se observa cierto grado de desviación en los elementos de Cr y Ti.

Tabla IV.5. Composición de los elementos aleantes presentes en el acero AC1 – 1.4510.

<b>Elemento</b>	<b>Análisis zona1, %</b>	<b>Análisis zona 2, %</b>	<b>Análisis zona 3, %</b>	<b>Media</b>	<b>desviación</b>
<b>Cr</b>	16,20	15,70	16,30	16,07	0,21
<b>Ti</b>	0,50	1,40	0,50	0,80	0,54
<b>Si</b>	0,40	0,50	0,50	0,47	0,01
<b>Mn</b>	0,50	0,50	0,40	0,47	0,01
<b>P</b>	0,00	0,10	0,10	0,07	0,01
<b>S</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**AC1 – 1.4512**

Finalmente, el estudio de las muestras 1.4512 revela la presencia al igual que en las muestras anteriores de precipitados de Ti.

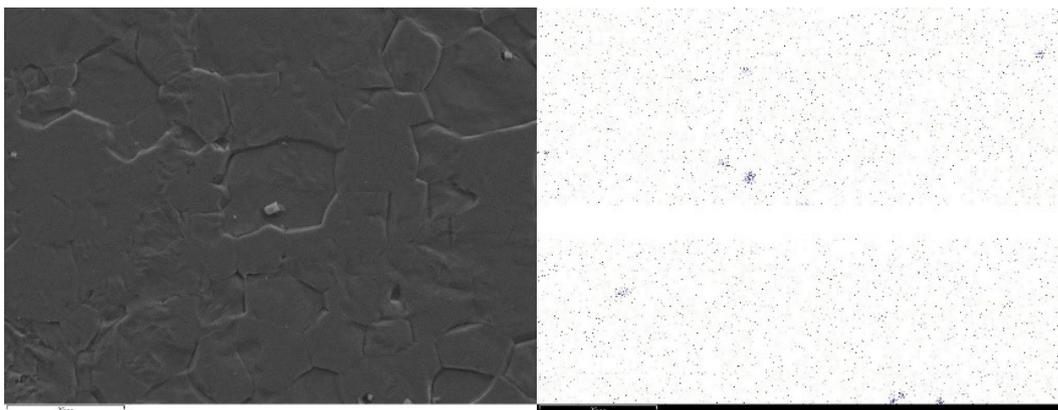


Figura IV.12 Imagen SEM de retrodispersados y distribución del Titanio en el acero AC1 - 1.4512.

En lo referente a la composición, cabe destacar la escasa desviación de los resultados en el análisis de la composición de las tres zonas de referencia.

Tabla IV.6. Composición de los elementos aleantes presentes en el acero AC1 – 1.4512.

Elemento	Análisis zona1, %	Análisis zona 2, %	Análisis zona 3, %	Media	desviación
<b>Cr</b>	11,20	11,30	11,40	11,30	0,02
<b>Mn</b>	0,50	0,30	0,50	0,43	0,03
<b>Si</b>	0,40	0,30	0,30	0,33	0,01
<b>Ti</b>	0,40	0,20	0,30	0,30	0,02
<b>P</b>	0,10	0,10	0,10	0,10	0,00
<b>S</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

## AC2

### AC2 – 1.4509

Las micrográficas muestran de nuevo la presencia de precipitados de Ti y Nb en la superficie de la muestra. Esta presencia de precipitados no es regular y existen zonas (zona de análisis 1) con ausencia de dichos precipitados.



Figura IV.13 Imagen SEM de retrodispersados y distribución de elementos aleantes en el acero AC2 - 1.4509.



Figura IV.14. Distribución del Titanio (izq) y el Niobio (der) en el acero AC2 - 1.4509.

En cuanto a composición, las diferentes zonas estudiadas muestran valores muy semejantes entre sí con una escasa variación de los valores de los elementos.

Tabla IV.7. Composición de los elementos aleantes presentes en el acero AC2 – 1.4509.

Elemento	Análisis zona1, %	Análisis zona 2, %	Análisis zona 3, %	Media	desviación
<b>Cr</b>	17,60	17,60	17,50	17,57	0,01
<b>Nb</b>	0,50	0,60	0,50	0,53	0,01
<b>Si</b>	0,40	0,60	0,40	0,47	0,03
<b>Mn</b>	0,30	0,30	0,40	0,33	0,01
<b>Ti</b>	0,20	0,40	0,30	0,30	0,02
<b>P</b>	0,10	0,10	0,10	0,10	0,00
<b>S</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**AC2 – 1.4510**

La presencia de un porcentaje mayor de Ti en la composición del acero 1.4510 permite la formación de mayor número de precipitados de Ti en el interior del material.

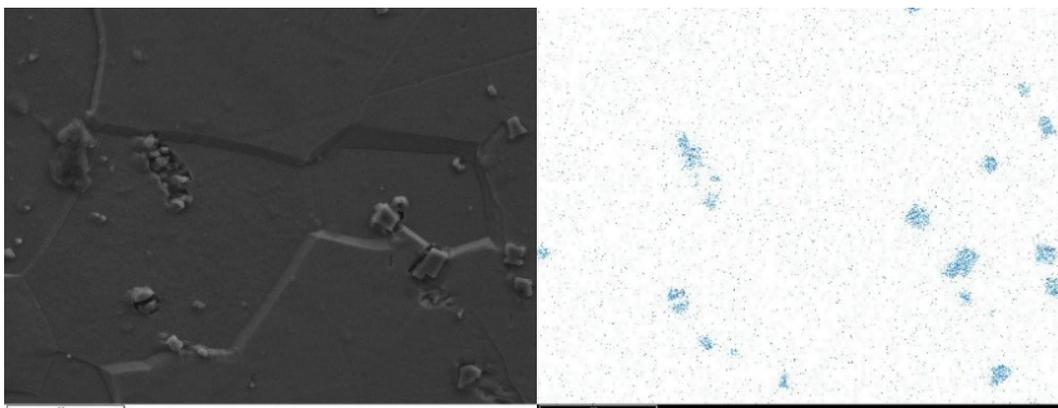


Figura IV.15. Imagen SEM de retrodispersados (izq) y distribución del Titanio en el acero AC2 - 1.4510.

En cuanto al análisis de la composición de las diferentes zonas cabe resaltar la elevada desviación de los valores de composición del Titanio, debido a la selección de zonas de mayor o menor concentración de precipitados.

Tabla IV.8. Composición de los elementos aleantes presentes en el acero AC2 – 1.4510.

Elemento	Análisis zona1, %	Análisis zona 2, %	Análisis zona 3, %	Media	desviación
<b>Cr</b>	16,20	15,40	16,30	15,97	0,49
<b>Ti</b>	0,50	1,40	0,50	0,80	0,54
<b>Si</b>	0,40	0,60	0,50	0,50	0,02
<b>Mn</b>	0,50	0,50	0,30	0,43	0,03
<b>P</b>	0,00	0,10	0,00	0,03	0,01
<b>S</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**AC2 – 1.4512**

Al igual que el resto de muestras, es clara la tendencia a la formación de precipitados consecuencia de la presencia de titanio en la composición del acero.

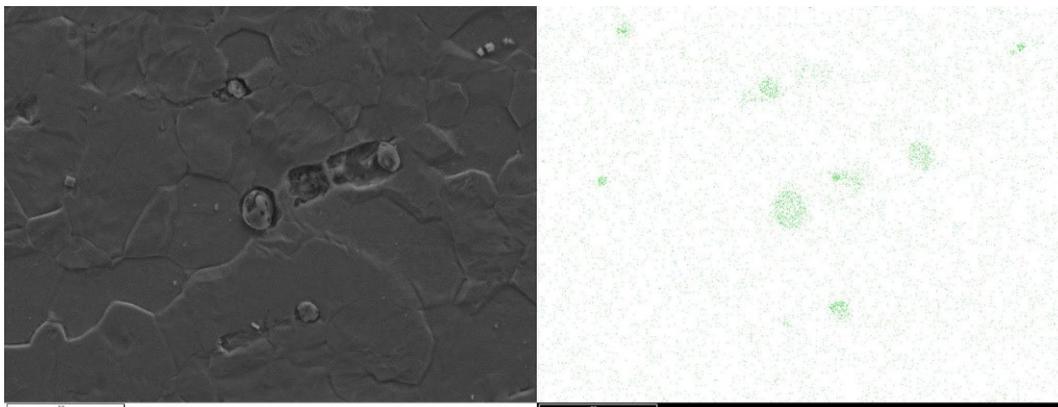


Figura IV.16 . Imagen SEM de retrodispersados (izq) y distribución del Titanio en el acero AC2 - 1.4512.

Respecto, el análisis de la composición los resultados no indican diferencias significativas comparadas con el resto de muestras.

Tabla IV.9. Composición de los elementos aleantes presentes en el acero AC2 – 1.4512.

Elemento	Análisis zona1, %	Análisis zona 2, %	Análisis zona 3, %	Media	desviación
<b>Cr</b>	11,20	11,00	11,40	11,20	0,08
<b>Mn</b>	0,50	0,30	0,50	0,43	0,03
<b>Si</b>	0,40	0,40	0,30	0,37	0,01
<b>Ti</b>	0,40	0,20	0,20	0,27	0,03
<b>P</b>	0,10	0,10	0,00	0,07	0,01
<b>S</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**AC3**

Finalmente, el análisis de las muestras suministradas por el tercer proveedor no muestra grandes diferencias respecto a las muestras anteriores.

**AC3 – 1.4509**

Al igual que el resto de las muestras analizadas la estructura que presenta la muestra es una estructura de tipo equiaxial, donde los bordes del grano quedan claramente definidos, además las micrografías permiten observar con claridad la presencia de precipitados de Ti y Nb, los cuales son corroborados con los respectivos mapas de la existencia de Ti y Nb de la zona analizada.

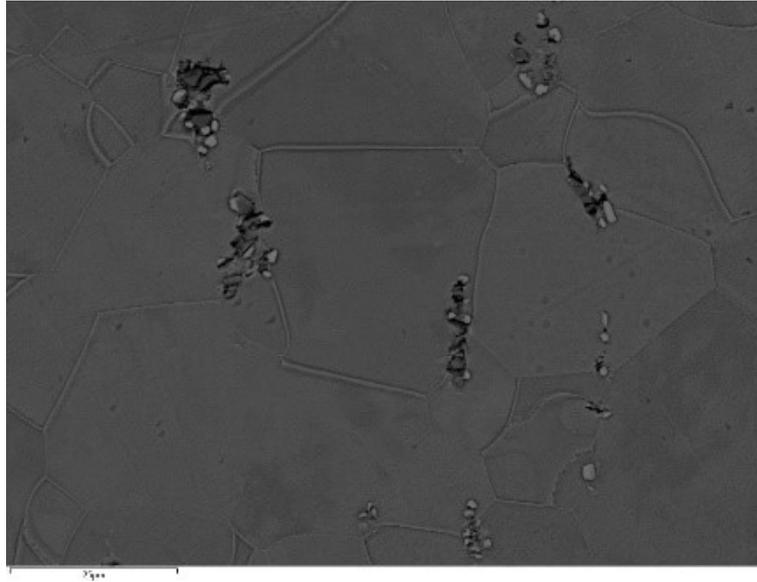


Figura IV.17. Imagen SEM de retrodispersados y distribución de elementos aleantes en el acero AC3 - 1.4509.

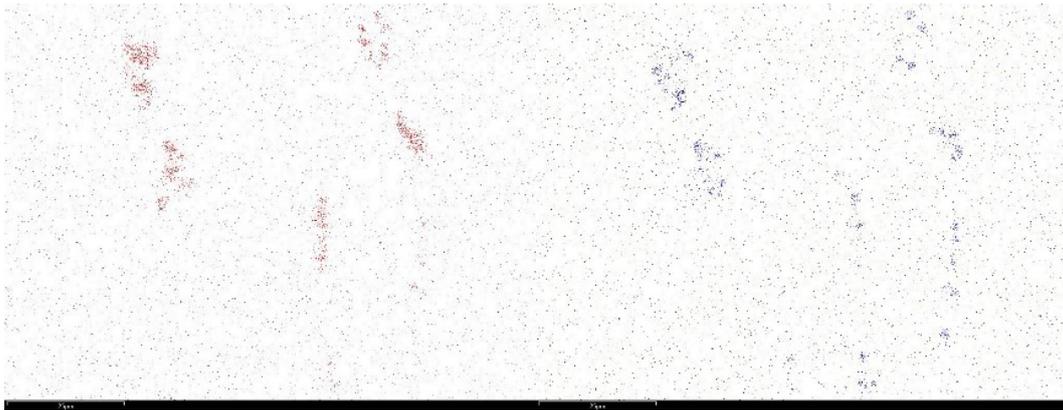


Figura IV.18. Distribución del Titanio (izq) y el Niobio (der) en el acero AC3 - 1.4509.

En lo referente a la composición de las diversas muestras sólo se observa una ligera desviación de los valores en los elementos de Nb y Mn, no siendo relevante dicha variación. Cabe destacar la presencia de altos contenidos de fósforo en la zona de análisis número 1, no siendo de especial relevancia debido a que en el resto de las zonas no se ha detectado su presencia.

Tabla IV.10. Composición de los elementos aleantes presentes en el acero AC3 – 1.4509.

Elemento	Análisis zona1, %	Análisis zona 2, %	Análisis zona 3, %	Media	desviación
<b>Cr</b>	17,90	17,90	18,00	17,93	0,01
<b>Nb</b>	0,90	0,70	0,60	0,73	0,05
<b>Ti</b>	0,60	0,50	0,40	0,50	0,02
<b>Si</b>	0,50	0,50	0,50	0,50	0,00
<b>Mn</b>	0,50	0,30	0,20	0,33	0,05
<b>P</b>	0,10	0,00	0,00	0,03	0,01
<b>S</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

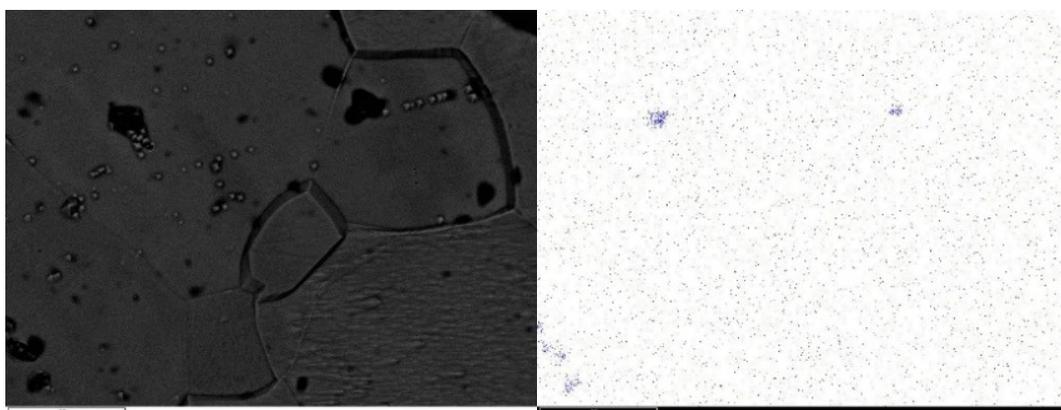
**C3 – 1.4510**

Figura IV.19 Imagen SEM de retrodispersados (izq) y distribución del Titanio (der) en el acero AC3 - 1.4510.

Tabla IV.11. Composición de los elementos aleantes presentes en el acero AC3 – 1.4510.

Elemento	Análisis zona1, %	Análisis zona 2, %	Análisis zona 3, %	Media	desviación
<b>Cr</b>	15,90	15,10	15,80	15,60	0,38
<b>Ti</b>	0,10	1,40	0,40	0,63	0,93
<b>Si</b>	0,20	0,50	0,50	0,40	0,06
<b>Mn</b>	0,10	0,50	0,20	0,27	0,09
<b>P</b>	0,10	0,10	0,00	0,07	0,01
<b>S</b>	0,00	0,00	0,10	0,03	0,01

**AC3 – 1.4512**

De nuevo se observan estructuras equiaxiales, estas han estado presentes en todas las muestras analizadas. La presencia de precipitados Ti son observables tanto en la imagen de microscopía electrónica como en el mapa correspondiente al elemento en sí.

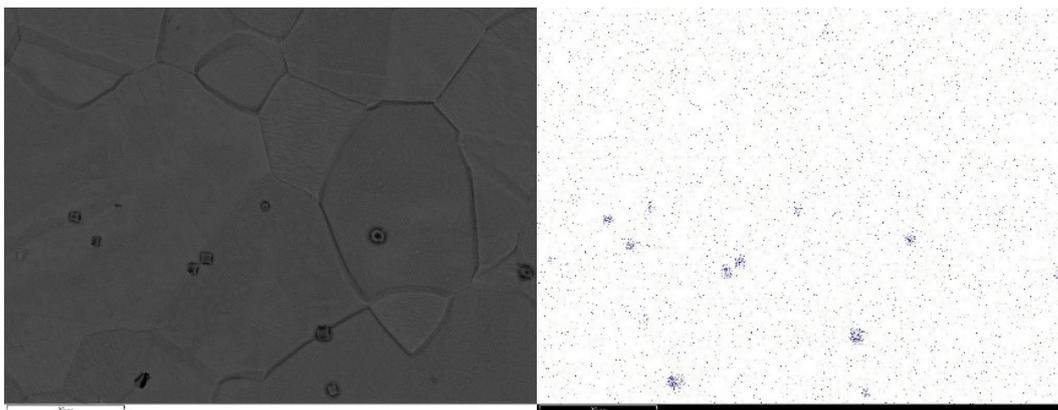


Figura IV.20 Imagen SEM de retrodispersados (izq) y distribución del Titanio (der) en el acero AC3 - 1.4512.

En cuanto a composición, las tres zonas estudiadas presentan composiciones con una mínima desviación en los valores de composición.

Tabla IV.12. Composición de los elementos aleantes presentes en el acero AC3 – 1.4512.

Elemento	Análisis zona1, %	Análisis zona 2, %	Análisis zona 3, %	Media	desviación
<b>Cr</b>	11,50	11,40	11,50	11,47	0,01
<b>Si</b>	0,60	0,60	0,60	0,60	0,00
<b>Mn</b>	0,60	0,60	0,50	0,57	0,01
<b>Ti</b>	0,40	0,30	0,20	0,30	0,02
<b>P</b>	0,10	0,00	0,10	0,07	0,01
<b>S</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

#### 1.1.6 Comparativa de composiciones.

La comparación de los resultados obtenidos tras el análisis de composición indica que todas las muestras presentan valores dentro de los parámetros establecidos para el acero EN 1.4509 a excepción del tipo AC2 que presenta valores de fósforo (P) por encima de los niveles recomendados.

Tabla IV.13. Comparativa entre la composición normalizada del acero EN – 1.4509 y la obtenida en las muestras de los diferentes suministradores.

<b>EN 1.4509</b>	<b>Elementos, %</b>	<b>AC1</b>	<b>AC2</b>	<b>AC3</b>
<b>Cr</b>	17.50 – 18.50	17,47	17,57	17,93
<b>Nb</b>	0.30 – 1.20	0,57	0,53	0,73
<b>Mn</b>	≤1.00	0,43	0,47	0,50
<b>Si</b>	≤1.00	0,30	0,33	0,50
<b>Ti</b>	≥0.10	0,23	0,30	0,33
<b>P</b>	≤0.040	0,03	0,10	0,03
<b>S</b>	≤0.015	0,00	0,00	0,00

En lo que respecta al acero EN 1.4510, las muestras analizadas presentan valores dentro de los estándares de calidad del acero anteriormente mencionado, exceptuando el AC1 y el AC2 que presentan un ligero incremento de la presencia de fósforo en la composición.

Tabla IV.14. Comparativa entre la composición normalizada del acero EN – 1.4510 y la obtenida en las muestras de los diferentes suministradores.

<b>EN 1.4510</b>		<b>AC1</b>	<b>AC2</b>	<b>AC3</b>
<b>Cr</b>	16.00 – 18.00	16,07	15,97	15,60
<b>Ti</b>	≤1.10	0,80	0,80	0,63
<b>Si</b>	≤1.00	0,47	0,50	0,40
<b>Mn</b>	≤1.00	0,47	0,43	0,27
<b>P</b>	≤0.040	0,07	0,03	0,07
<b>S</b>	≤0.015	0,00	0,07	0,03

Finalmente, en la última serie analizada de nuevo el fósforo supera las cantidades recomendadas para este tipo de aceros, aunque no se trata de una gran desviación respecto a las composiciones que indica la norma, su uso no es recomendable.

Tabla IV.15. Comparativa entre la composición normalizada del acero EN – 1.4512 y la obtenida en las muestras de los diferentes suministradores.

<b>EN 1.4512</b>		<b>AC1</b>	<b>AC2</b>	<b>AC3</b>
<b>Cr</b>	10.50 – 12.25	11,30	11,20	11,47
<b>Mn</b>	≤0.80	0,43	0,43	0,60
<b>Si</b>	≤0.75	0,33	0,37	0,57
<b>Ti</b>	≤0.5	0,30	0,27	0,30
<b>P</b>	≤0.040	0,10	0,07	0,07
<b>S</b>	≤0.015	0,00	0,00	0,00

De todo este análisis de materia prima se elaboran fichas de comparar de material inoxidable, las cuales se convierten en las especificaciones de comprar a siderurgia.

1.1.7 Conclusiones parciales.

Las conclusiones parciales que se han obtenido del análisis de la materia prima conducen a la confección de una ficha de compra de los diferentes materiales inoxidables ferríticos, con el objetivo de acotar los elementos que no son ventajosos para la fabricación y soldadura láser, comprar un material con un tamaño de grano adecuado para después someter el material a grandes deformaciones de conformado, y estar libre de imperfecciones que lo puedan invalidar por cliente.

De este modo queda generada por Flinsa una ficha de compra para materiales inoxidable ferrítico, grados:

- 1.4509,
- 1.4510,
- 1.4512.



FTM (Ficha técnica material)  
ACERO INOXIDABLE

Rev.3  
24/04/2019

Grados Ferrítico.

Designación Simbólica EN 10088	Designación Numérica EN	Designación AISI/ASTM
X2CrTiNb18	1.4509	441
X3CrTi 17	1.4510	439
X2CrTi12	1.4512	409

- Acabado: 2D o 2E
- Composición Química:

Designación	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	otros				
										Númerica	Simbólica	Max.	Max.
1.4509	X2CrTiNb18	0.030	1.00	1.00	0.015	0.040	17.50-18.50	-	-	Nb [0.3-1.20] Ti [0.10-0.60]			
1.4510	X3 CrTi 17	0.050	1.00	1.00	0.015	0.040	16.00 -18.00	-	-	4X(C+N) +0.15sTis0.80 Als0.05			
1.4512	X2 CrTi 12	0.030	1.00	1.00	0.015	0.040	10.50 -12.50	-	-	Ti=6X(C+N) a 0.65 Als0.05			

- Propiedades mecánicas:

Designación	Rp MPa min.	Rm (N/mm <sup>2</sup> ) Resistencia a rotura	A(%) Alargamiento % min.
1.4509	230	430 - 630	25%
1.4510	300	420 - 520	35%
1.4512	300	420 - 480	35%

\*\* Las propiedades elásticas deben ser las más altas posibles para obtener un buen conformado en las piezas de cliente que son muy exigentes.

- Microestructura:
  - o Impurezas máximas según ASTM E45, método A. ≤ 3.5

Forma del grano regular y lo más uniforme posible, con propiedades homogéneas tanto en la dirección longitudinal como transversal y con una diferencia máxima entre sus propiedades del 5%.

- o Tamaño de grano: Según ASTM E 112, debe ser mínimo 6 o más fino.
- Aspecto superficial: Libre de marcas, golpes, óxido y cualquier otro defecto superficial (soja, agujeros, falta de material), incluidas diferencias de tonalidad.
- Estado de los bordes: cortados.
- Tolerancias en espesor: ±0.07mm
- Ensayo de corrosión intergranular: Según EN ISO 3651-2, método A. Indicar resultados en certificados de inspección 3.1. *Nota: No aplica a grado 1.4512.*

Proveedor	Fdo:
	Fecha:

Figura IV.21 ficha de compra material acero inoxidable ferrítico

## 1.2 Análisis máquina – método – mano de obra.

La siguiente etapa en analizar es la máquina, método y mano de obra a la vez, en este apartado se buscan encontrar las causas que hacen una soldadura no válida para ser usada los materiales soldados mediante procesado láser en continuo.

Las posibles causas para generar problema en la soldadura se han dividido por cada una de las ramas a estudiar, estas se encuentran en la tabla inferior:

Rotura de soldadura aleatorio		
<b>Máquina</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mal funcionamiento sistema seguimiento de ranura</li> <li>• distancia excesiva entre P10- zona de soldadura.</li> <li>• Equipo de soldadura genera irregularidades</li> <li>• Se generan tensiones internas en el conformado del tubo</li> <li>• No se elimina adecuadamente el agua de los bordes del tubo.</li> </ul>	<b>Método</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estándar no configurado correctamente.</li> </ul>	<b>Mano de obra</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Regulación incorrecta de:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Punto focal.</li> <li>• Presión rodillos soldadura.</li> <li>• Potencia.</li> <li>• Velocidad de trabajo.</li> <li>• Caudal de gases.</li> </ul> </li> </ul>

Antes de atacar las causas es conveniente entender el fundamento de cómo se fabrica el tubo, viendo los factores que intervienen para poder acotar su grado de afectación, dando lugar a encontrar el mejor método.

### 1.2.1 Fabricación del tubo.

Hay procesos industriales específicos para este acometido, estas son las máquinas de fabricación de tubo en continuo llamadas en inglés *Mill machine*, donde se introduce materia prima en forma de banda plana, y una vez ha pasado por el proceso se obtiene el tubo soldado listo para ser utilizado.

**Composición de una máquina básica de fabricación de tubo:**

Se pueden distinguir varias etapas:

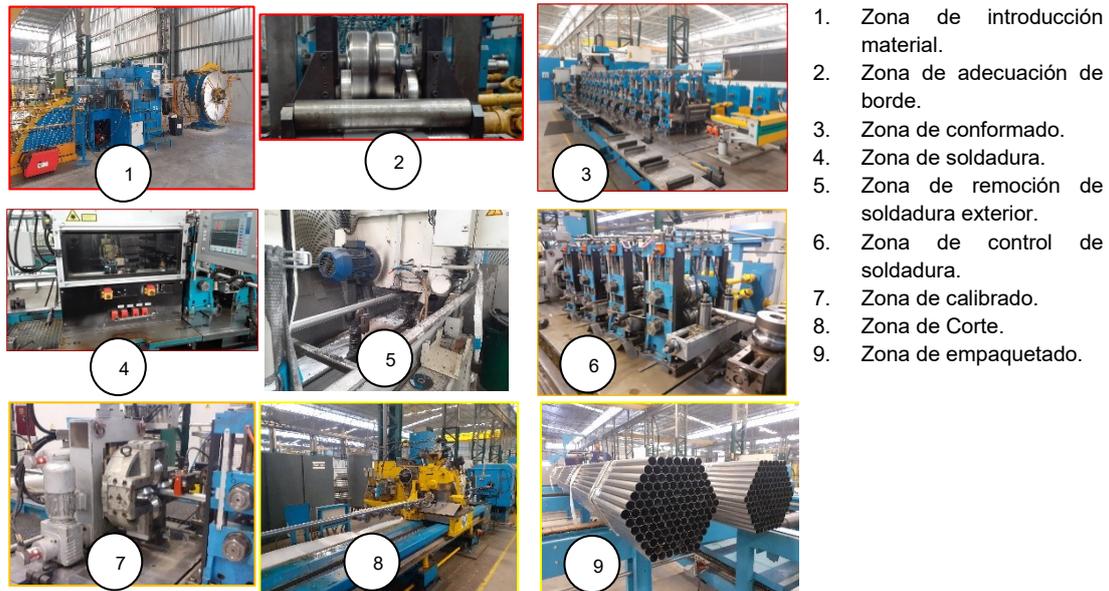


Figura IV.22 Partes de la máquina inoxidable Dreistern Flinsa.

En esta secuencia de imágenes se pueden apreciar los distintos elementos que conforman una máquina para la fabricación de tubo.



Figura IV.23 Vista panorámica de la máquina Dreistern.

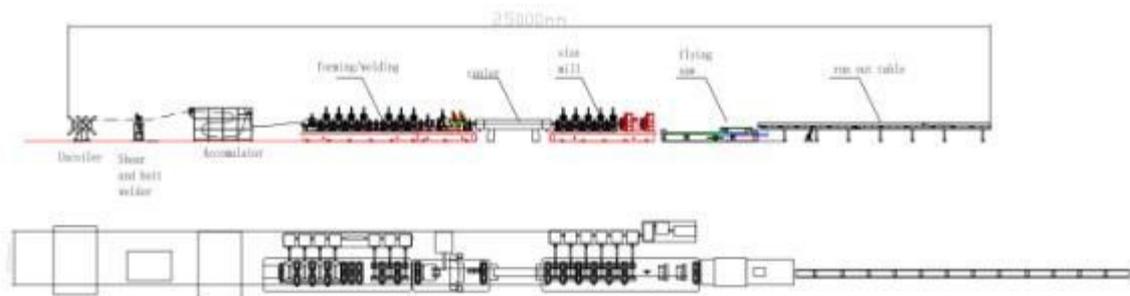


Figura IV.24 . Layout de máquina genérica, (imagen de Google)

Etapas del proceso de fabricación desde que llega el material en forma de bobina, se transforma en fleje, pasa por el proceso de fabricación de tubo, y se generan los tubos para cliente.

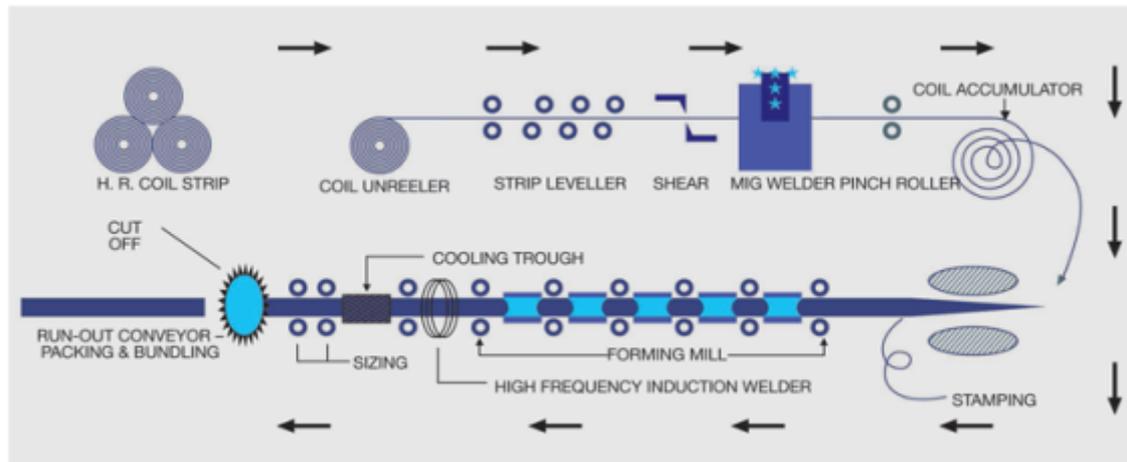


Figura IV.25 Etapas de la obtención de un tubo

#### Funcionamiento:

La materia prima proveniente de siderurgia llega en formato de bobina de anchos comprendidos de 1200mm a 1500mm, y pesos próximos a los 24 Tm.

Estas bobinas son cortadas a los anchos requeridos en las líneas de corte, a través de una cizalla, creándose varias tiras al desarrollo que se necesite para la fabricación del tubo.

El acho de fleje o banda viene determinado por el desarrollo del diámetro redondo madre del tubo:

$$\text{Ancho fleje} = \pi \cdot D \cdot A$$

Donde:

**A** es un factor corrector, en función del espesor y de la resistencia del material.

**D** es el diámetro madre del tubo a fabricar.

$\pi$  es el nº pi.

Ejemplo, se quiere fabricar un tubo cuadrado de 40x40x1.50mm, ¿cúal es su diámetro madre de partida para calcular el ancho de corte?

**1º el desarrollo del tubo será:**

$4 \times 4 = 160\text{mm}$  (sin tener en cuenta los radios del tubo, ya que no es un cuadrado perfecto)

**2º Diámetro madre:**

$D \text{ madre} = 160 / \pi = 50.929$  esto significa que la familia para fabricar este perfil será el diámetro 50.8

**3º ancho de fleje final:**

$A = 50.8 \cdot \pi \cdot 0.987 = 157.5 \text{ mm}$

El factor corrector, es obtenido de la experiencia y el KNOW-HOW, del proceso. Ya que normalmente el fabricante de utillajes da unos anchos de fleje que son función con el espesor, pero dependiendo de la forma de trabajar hay que ir retocando para ajustar a la necesidad del proceso.

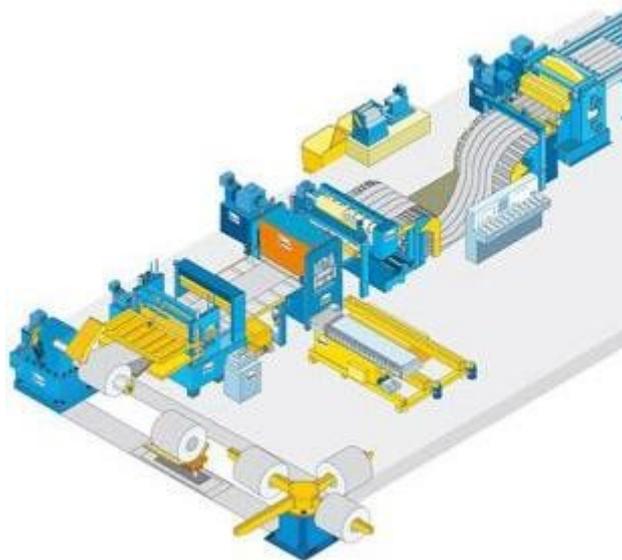


Figura IV.26 Línea de corte genérica, (imagen de Google)

Es necesario que el fleje que sale del proceso de corte por cizalladura tenga las siguientes características:

- Borde regular, sin rebabas ni mellas
- Libre de impurezas tanto metálicas como líquidas.
- Rollos bien apretados que no presenten problemas de seguridad.
- De las dimensiones requeridas.

Seguidamente ese fleje, con el ancho desarrollo del diámetro se introduce en la máquina de fabricación de tubo, pasando por todas las estaciones;

En la primera estación (introducción), la materia prima se va desenrollando y pasa a través de una sección de aplanado bajo tensión, para dejar al fleje lo más perfecto posible para su entrada a la conformadora, aunque antes de llegar aquí si fuera

necesario un sistema de rectificado de borde por arranque de viruta se encargaría de preparar los bordes, para que se puedan enfrentar de la mejor manera posible cuando llegue el momento de soldarlo.

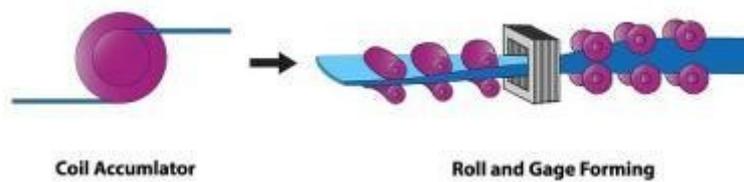


Figura IV.27 Esquema del proceso de conformado

Una vez que ha llegado el material a la conformadora, progresivamente se le va dando la forma de tubo, pasando de una banda plana a una forma redondeada de tubo, pero sin soldar, para ello el material ha pasado a través de varias etapas de perfilado, una etapa de perfilado está compuesta por rodillos verticales y rodillos laterales.

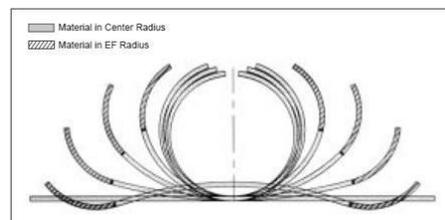


Figura IV.28 sección de todas las etapas de deformación.

En la primera etapa de deformación se le da la forma a los bordes, para que cuando llegue a la estación de soldadura su enfrentamiento sea el óptimo para ser soldado.

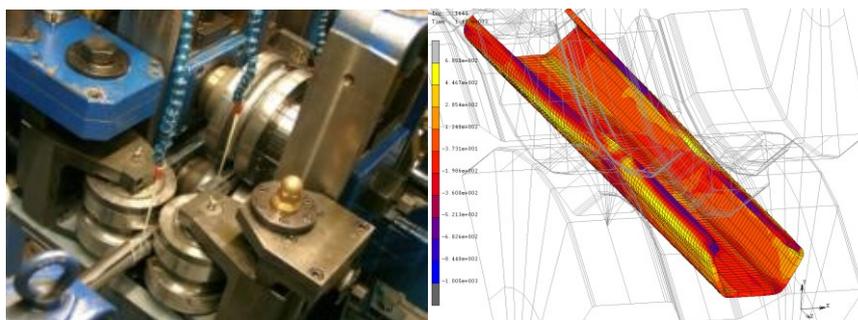


Figura IV.29 imagen de la izquierda etapa con paso vertical y horizontal – Imagen de la derecha gráfica de esfuerzos sobre el fleje en un paso vertical.

La misión de los siguientes pasos es ir dando forma progresivamente a través de esfuerzos superiores al  $R_e$  del material, los rodillos verticales se encargan de esta deformación, los rodillos laterales son los responsables de aguantar la forma sin apenas transmitir deformaciones.

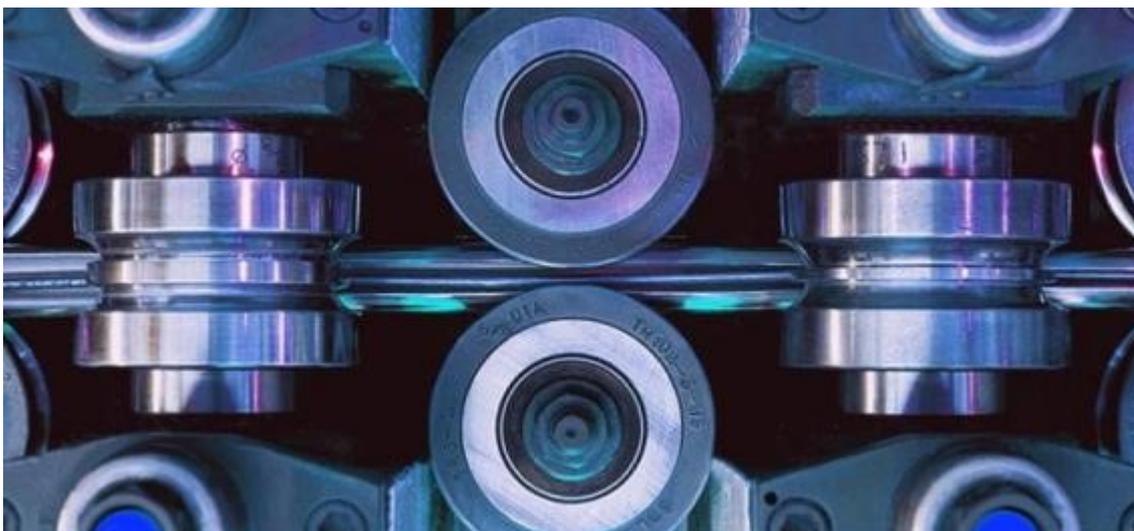


Figura IV.30 Vista superior de la etapa del *fin pass*

La siguiente etapa es la soldadura, que puede ser de diversos tipos, se explicará más adelante.

Seguido de la soldadura se encuentra el sistema de eliminación del cordón de soldadura exterior, este simplemente se encarga de remover el sobrante de material, para dejar al tubo lo más uniforme posible.

La parte siguiente es la calibradora, es la responsable de obtener el tubo con las dimensiones requeridas por el cliente, para lo cual utiliza el mismo principio de funcionamiento de la conformadora, la diferencia está en que el tubo está ya soldado, entremedias de la calibradora se encuentra un defectómetro, encargado de encontrar cualquier defecto o deficiencia de la soldadura, este elemento funciona a través del principio de funcionamiento de corrientes inducida de Foucault, y cualquier diferencia que encuentre desde el momento de su calibración va a ser detectada,

La última parte antes de salir de la calibradora son las cabezas de turco, estas se emplean para transformar al tubo en la forma que se desee, es decir con estas se va a cambiar la forma del tubo redondo a la que se quiera, cuadrada, rectangular, ovalada, etc. Normalmente se emplean 4 cabezas como se detalla abajo, de tal modo que progresivamente se cambia la geometría al tubo, la última de ellas se emplea para enderezar la rectitud y la torsión del tubo.

La próxima etapa es el corte a la longitud deseada para posterior empaquetado.

**Utillaje, dentro de la conformadora y calibradora:**

Hay muchos diseños y tipos de rodillos, siempre dependiendo del tipo de deformación a la que se le vaya a someter a la banda plana, agrupando los tipos se pueden resumir en cinco tipos:

- Rodillos primera etapa de la formación. (braek down)
- Rodillos segunda etapa de la formación. (fin pass)
- Rodillos de soldadura.
- Rodillos de la calibradora. (Sizing)
- Rodillos de cabezas de turco

Estos primeros que se ven en la imagen son de la primera etapa en concreto es

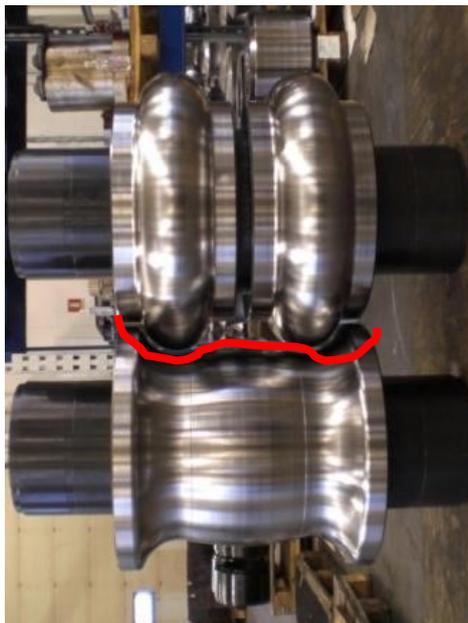


Figura IV.31 Rodillo eurolls. Paso 1

un rodillo típico del paso 1 de la formación, que es algo diferente al resto, porque tiene una misión muy importante y específica, la cual es dar la forma a los bordes de la banda, para que cuando termine de formar a la banda, estos bordes se enfrenten lo mejor posible en la soldadura y se obtenga producto soldado correctamente, este tipo de rodillos está hasta casi la mitad de la formación. Estos van cambiando la geometría poco a poco al siguiente tipo de rodillo.

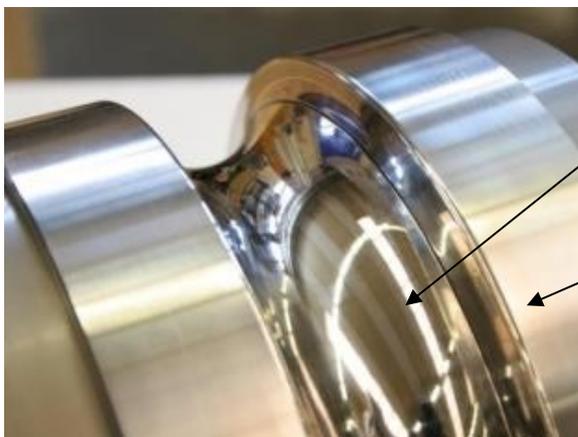


Figura IV.32 Etapa del *brake down* formación

Este paso, con los rodillos verticales, también es de la primera etapa, ya se observa cómo va haciendo la forma del tubo más pronunciada.



En esta otra imagen, se ve la secuencia de paso de los rodillos superiores de la etapa de formación, y como la huella que va dejando el rodillo sobre la banda va de más a menos. Como se observa en la imagen de más abajo, en la secuencia que sigue la banda hasta llegar a la soldadura.



Núcleo, (parte central) 1

Exterior, (parte lateral) 2

Figura IV.33 Rodillo eurolls. Imagen superior muestra la evolución de las etapas del, Imagen inferior muestra rodillo de calibradora especial, con parte exterior libre.

En este rodillo se aprecian dos partes, por un lado, tenemos el núcleo parte 1, y luego la parte externa del rodillo, a esta se le va a llamar parte 2. Esto tiene esta morfología, porque la velocidad que lleva la banda en cada parte del rodillo es diferente, produciendo una rodadura en la parte exterior, por lo que los diseñadores, han creado esa parte loca, de tal modo que puede girar a distinta velocidad que el núcleo, que está ejerciendo la deformación, y no se produzcan marcas ni irregularidades en esta parte exterior.

Este tipo de rodillos son característicos a partir de mitad de formación hacia delante, y por supuesto en la calibradora. En la formación, estos rodillos tienen una cuchilla, que guía a la banda para que vaya lo más centrado posible en el eje de la máquina.

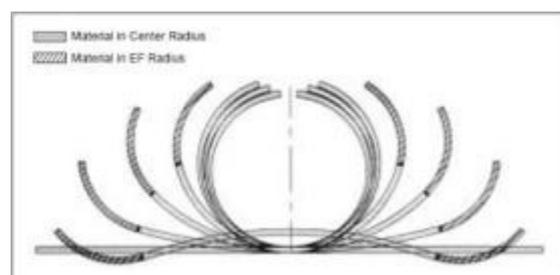


Figura IV.34 Sección transversal de todos los pasos de la conformadora.

En esta imagen se observa el desarrollo, y las fases por las que ha pasado la banda hasta llegar al momento de la soldadura, y se puede apreciar, como se ha ido reduciendo la distancia entre los bordes, y esa distancia ha ido variando paso a paso, pues para que la banda vaya bien alineada en ese hueco que no hay material se pone una cuchilla en el rodillo superior de modo que hace de guía y mantiene en todo momento arriba los bordes, ya que cualquier desequilibrio de esfuerzos por cualquier rodillo genera un par de torsión, que gira a la banda, y sin estos elementos se podría dar el caso de que no entrase bien en la etapa de soldadura y soldara fuera de lugar, es decir fuera de los bordes

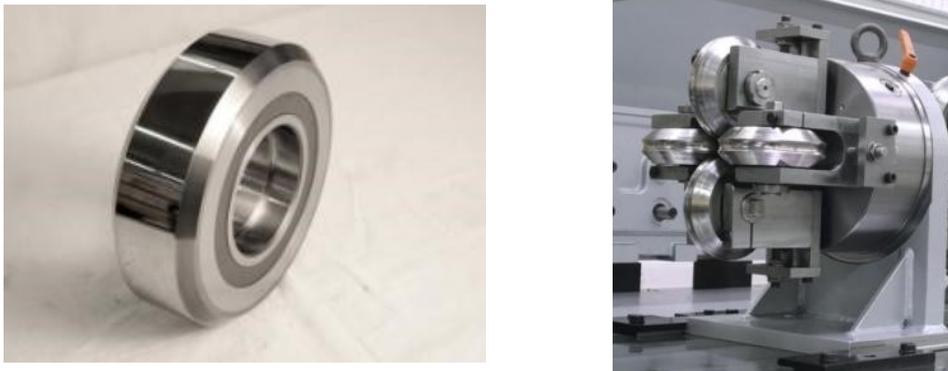


Figura IV.35 imagen izquierda rodillo plano de cabeza de turco, imagen derecha cabeza de turco

Aquí se pueden observar dos tipos de rodillos distintos de las cabezas de turco, el de la imagen de la izquierda, es para un tubo de caras planas, y el que está montado en la cabeza de turco, es para un tubo redondo.

Cuando se habla de tubo redondo, estos no tienen que deformar al tubo sólo se utilizan para corregir desviaciones de rectitud.

Cuando se está trabajando con tubo de sección diferente a la redonda, trabajan los tres primeros pasos de las cabezas de turco, y el último es el que corrige con ajuste fino las tolerancias del tubo, y además es el encargado de corregir las desviaciones de rectitud y torsión.

#### Proceso de soldadura:

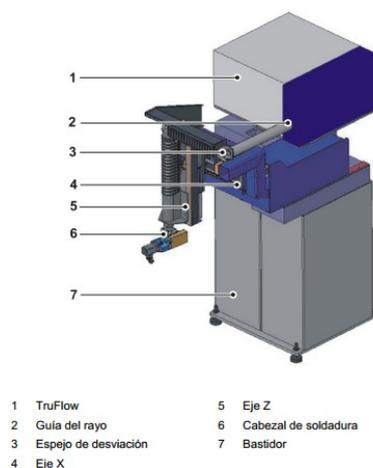


Figura IV.36 Equipo de soldadura.

Para poder realizar la soldadura se utiliza una fuente láser de CO<sub>2</sub> el dispositivo tiene una potencia de 8Kw, es el modelo TruLaser Cell 1100 (CO<sub>2</sub>), con una longitud de onda de 10,6 μm de la marca TRUMF.

**Principios de la soldadura láser de CO<sub>2</sub>**

Para la obtención de la unión soldada de los dos bordes del tubo se necesita aplicar presión y temperatura, todo esto debe darse en una atmósfera controlada, es decir en atmósfera inerte de Argón o Helio, la presión es aplicada a través del grupo de rodillos de soldadura, y la temperatura viene de la fuente láser de CO<sub>2</sub>

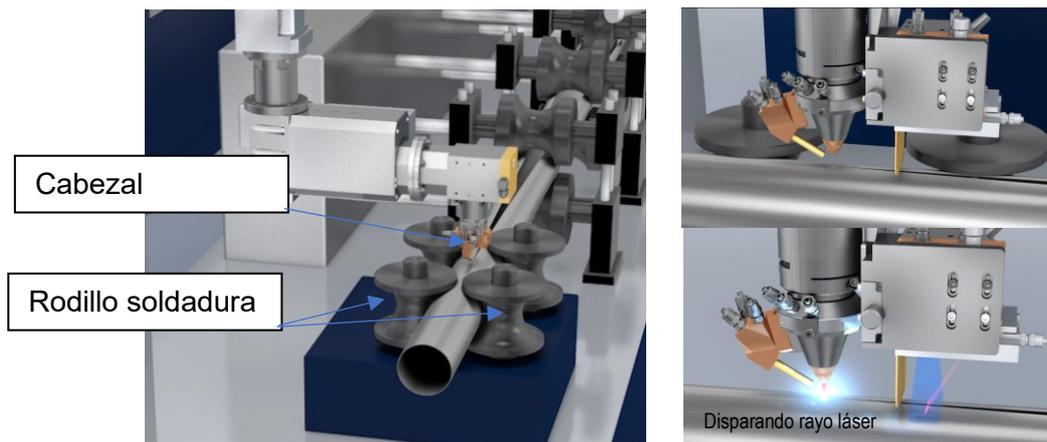


Figura IV.37 pictograma de la zona de soldadura (imagen izquierda). Posición del cabezal y sistema de seguimiento de ranura (imágenes derechas)

En este tipo de soldadura se utilizan las características de las propiedades de la luz láser para producir una alta densidad de energía focalizada en una superficie pequeña con la finalidad de fundir el material a soldar.

**Características de la luz láser:**

- Alta direccionalidad
- Monocromaticidad
- Coherencia
- Brillo

Fuente	Direccionalidad	Monocromaticidad	Coherencia
Luz			
Lámpara de bulbo		Longitud de onda no uniforme	
Haz láser			
Láser		Longitud de onda uniforme	Semionda alta y baja alineada

Figura IV.38.- Comparativa entre las propiedades de la luz láser y la luz normal



Figura IV.39 generador láser (imagen izquierda). Recorrido láser hasta cabezal (imagen derecha)

La fuente láser es la encargada de producir el rayo láser y este es transportado por diferentes espejos hasta llevarlo al cabezal de soldadura, donde con un espejo especial es focalizado para alcanzar la mayor energía en un punto de un diámetro próximo a 0.05mm

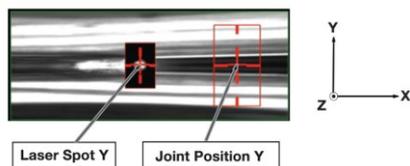


Figura IV.40 Sistema de seguimiento de ranura. Cortesía de Trumpf maquinaria

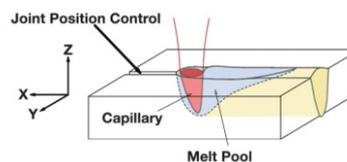


Figura IV.41 Esquema del material en la soldadura

Este tipo de soldadura está apoyado por un sistema de seguimiento de la soldadura, como se puede observar en la imagen superior izquierda, el cual siempre mantiene la posición correcta entre el cabezal y la junta de los bordes. En la siguiente Figura, se muestra la forma característica de soldadura de un proceso láser, donde se ve un foco de alta energía, fusión del material y el baño.

**Datos técnicos de recorridos y velocidades del equipo.**

<b>TruLaser Cell 1100</b>	<b>Zona de trabajo</b>	
	Eje X	300 mm, 500 mm
	Eje Z	300 mm, 500 mm
	Eje Q	50 mm
	Eje B	$\pm 100^\circ$
	<b>Velocidad máx. del eje</b>	
Eje X	30 m/min	
Eje Z	30 m/min	
	<b>Precisión</b>	
Medida mín. de recorrido programable	0.1 mm	
Exactitud de repetición	0.03 mm	
	<b>Nivel de presión sonora en las superficies de medición</b>	$L_{pAeq} \leq 75$ dB

**Parámetros críticos del proceso de soldadura láser**

- Altura focal
- Posición del eje X
- Estado de los bordes
- Potencia de soldadura
- Velocidad de proceso
- Conformación del fleje

Seguidamente se busca la optimización de estos parámetros para poder ejecutar una soldadura correcta, y de calidad, el primer parámetro sobre el que se ha trabajado ha sido el punto focal:

1. Posición del punto focal. (altura focal), esta es la altura a la cual el rayo láser incide con la mayor potencia en el punto de enfoque.

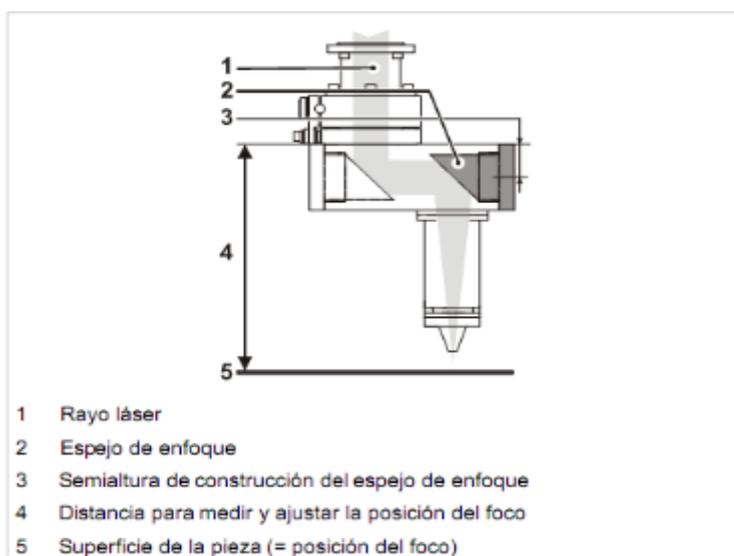


Figura IV.42 Esquema sistema láser

La posición del punto focal es clave en el proceso de soldadura por láser, ya que esta altura va a determinar la correcta soldadura de los bordes del fleje. Si la altura seleccionada es inferior a la óptima la incidencia del haz láser sobre los bordes del fleje se realizará con una potencia excesiva y una huella de haz láser grande, ampliando la ZAT por encima de lo necesario y de lo característico de esta soldadura, ya que la

soldadura por láser se caracteriza por presentar una ZAT de anchura mínima. A esta altura del punto focal inferior a la óptima, se suma el efecto de “quemado” de los granos del borde de fleje, fragilizándose y haciendo que la propia soldadura sea fácilmente quebradiza sin llegar a soportar los ensayos que requiere la norma.

Si por el contrario, la altura del punto focal es superior a la distancia óptima, la intensidad con la que incide el haz láser será menor requiriendo una mayor potencia en la soldadura de forma que aumentará la probabilidad de aparición de “bolas” en el cordón de soldadura, ya que debido a la mayor potencia aplicada el material de los bordes soldados aumentará su fluidez y se producirá un descolgamiento del mismo en el cordón de soldadura creando estas “bolas” tras el enfriamiento del cordón tras el proceso. Además, aumenta el riesgo de realizar imperfecciones en la propia soldadura que deriven en problemas y/o roturas de la misma al procesar el tubo en procesos secundarios.

Para la obtención de la altura del punto focal óptimo se han realizado varias pruebas de soldadura a diferentes alturas, y posteriormente se han ensayado dichas pruebas según norma para comprobar la resistencia de la soldadura.

Para cada altura focal escogida, se ensayaron 20 muestras, y se realizó un registro diferenciando la altura focal necesaria para los aceros inoxidable ferríticos y el resto de los aceros inoxidable (austeníticos y dúplex)

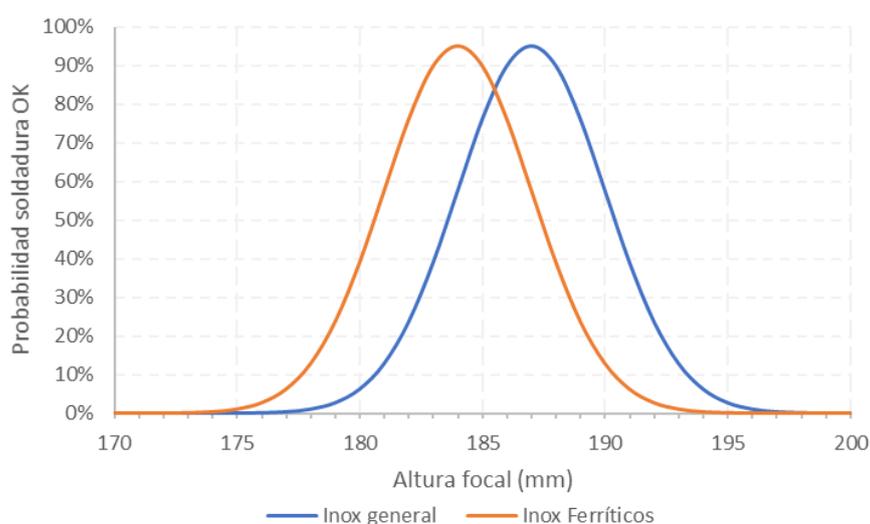


Figura IV.43 Representación gráfica porcentual de la eficacia de la soldadura en función de la altura focal.

Para los aceros inoxidable austeníticos y Dúplex, una altura focal de 187mm nos aseguraba un alto porcentaje de tubos con soldadura OK, mientras que, para esa misma altura, el porcentaje de rotura en los aceros inoxidable ferríticos se encontraba en torno al 60%. Tal y como se observa en la figura superior, los aceros inoxidable ferríticos necesitan una menor altura focal para realizar la correcta soldadura del material.

2. Posición en X correcta. Es la distancia óptima desde el centro de los rodillos de soldadura hasta el punto de incidencia del haz láser sobre los bordes del fleje-.

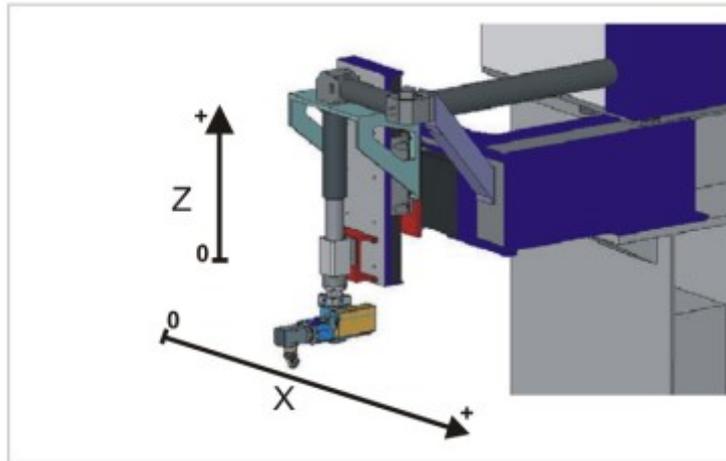


Figura IV.44 Esquema posición X sistema láser

El cabezal de soldadura de esta máquina consta de 2 pares de rodillos gemelos que sujetan el fleje durante su paso por el mismo. Es de vital importancia que los bordes del fleje se mantengan lo más estables posible durante el proceso de soldadura, ya que el haz láser incide en una zona muy estrecha de ambos flejes y cualquier movimiento o desajuste del borde del fleje puede derivar en ausencia de soldadura y provocar un fallo cuando el tubo tenga que ser procesado posteriormente.

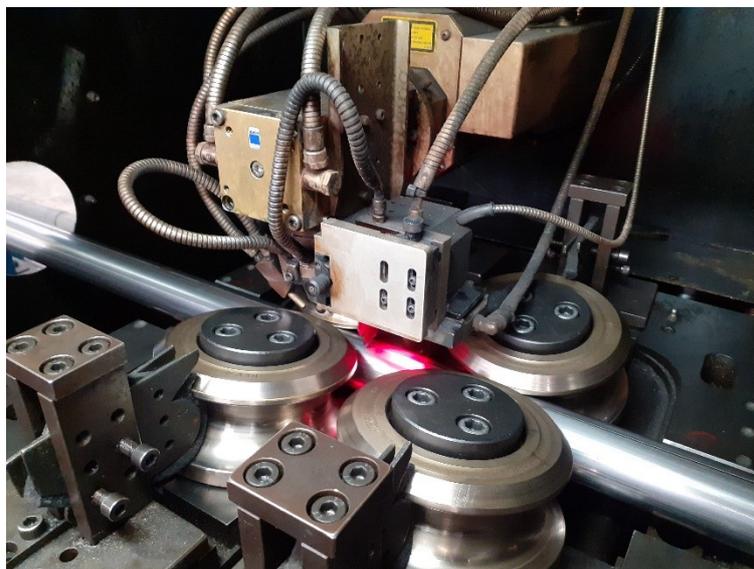


Figura IV.45 Cabezal de soldadura

Según el fabricante, la soldadura ha de realizarse en los primeros rodillos, ya que de esta forma los segundos rodillos sujetan la unión soldada y evitan que se esta se abra inmediatamente después de realizar la soldadura. Según nuestra experiencia, realizar la soldadura en este punto (centrado al eje de los primeros rodillos) genera numerosos problemas. En primer lugar, debido a la distancia que existe entre el último paso de la conformación y el primer rodillo de la cabeza de soldadura, se produce un efecto de recuperación elástica en el fleje abriéndose el tubo, por lo que se separan los bordes del fleje ya conformado en tubo redondo. Esto genera “aleteos” en el borde de fleje de

manera que pierde el correcto enfrentado a la salida de la conformadora para volver a enfrentarse nuevamente en el primer rodillo de la cabeza de soldadura. Este “nuevo” enfrentamiento de bordes en los primeros rodillos de la cabeza de soldadura no se produce de forma estable por lo que produce problemas en la soldadura. Además, al llegar los bordes del fleje muy separados a este primer rodillo, la Cabina óptica del perfilómetro de la soldadura puede no llegar a detectar los bordes del fleje e interrumpir la soldadura de forma inmediata.

Por los inconvenientes mencionados anteriormente, se retrasa el sistema de soldadura láser a los segundos rodillos de la cabeza de soldadura (tal y como se muestra en la Figura IV. 46). De esta forma al realizarse la soldadura en el 2<sup>a</sup> par de rodillos, la función del primer par de rodillos será estabilizar el enfrentado de bordes para que lleguen los más constantes al punto de soldadura, ya que al presentar una distancia muy baja entre ambos pares de rodillos se minimiza al máximo el efecto de recuperación elástica del material. Además, de esta forma, la Cabina óptica del perfilómetro detecta en todo momento los bordes del fleje y no interrumpe la soldadura por ausencia de los mismos.

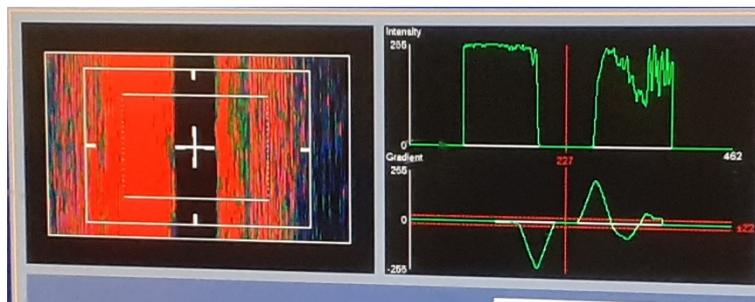


Figura IV.46 Detalle del perfilómetro de bordes del sistema de soldadura

Una vez posicionada la soldadura en los 2<sup>os</sup> rodillos del cabezal de soldadura, la posición óptima y donde mejor contacto tendrán los bordes del fleje será en el punto intermedio entre los 2 ejes de los rodillos. Este punto será el de máximo contacto entre los bordes del fleje y donde presentará la máxima presión para favorecer la soldadura.

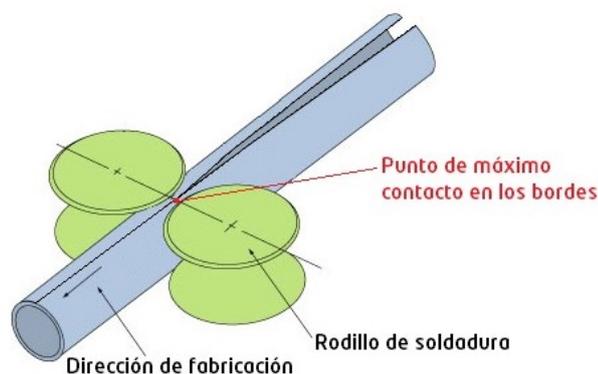


Figura IV.47 Punto de máximo contacto en los bordes del fleje

A partir de este punto se estudió como podía influir el movimiento del haz láser en la dirección de fabricación (posición X) en la propia soldadura. Los resultados ha sido los mostrados en la figura inferior; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde se refleja el porcentaje de muestras OK y muestras NOK tras los ensayos estándares de fabricación con el haz láser posicionado a un máximo de  $\pm 10$ mm desde la posición de máximo contacto en los rodillos 2<sup>os</sup> del cabezal de soldadura.

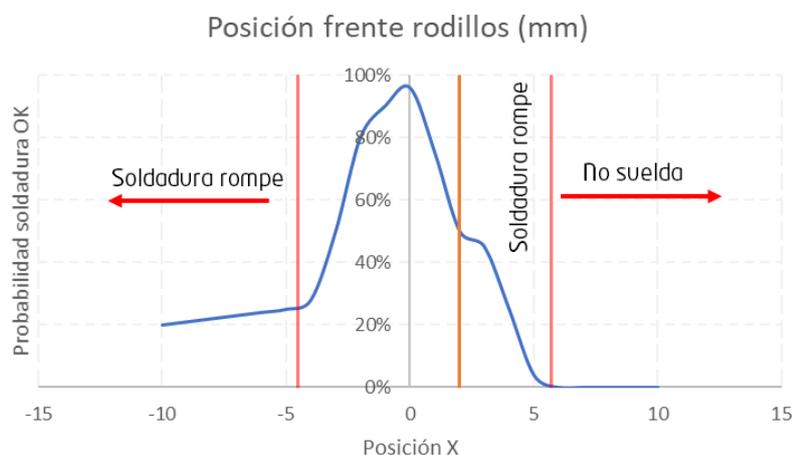


Figura IV.48 Resultados de soldadura con respecto a la posición X.

En el gráfico se observa como a partir de 6mm tras los rodillos de soldadura no se puede producir la soldadura del fleje, ello es debido a que a partir de dicha distancia la recuperación elástica del material tiende a separar los bordes de forma que, aunque el haz láser llega a fundir los mismos al no haber un fuerte contacto entre ellos, no se produce la soldadura. Entre 4 y 6mm, se llega a producir la soldadura, pero al no ejercerse la presión necesaria para el calado de los bordes del fleje la soldadura rompe en la realización de los ensayos estándar de fabricación.

En una posición anterior al centro de los ejes de los rodillos (0mm) se observa como debido a la estabilización del primer par de rodillos la soldadura se produce, pero la integridad de la misma se ve mejorada a medida que nos acercamos a la posición 0. Ello se debe a que al realizar la soldadura láser con anterioridad al punto de máximo contacto al fundir los cantos del fleje cuando estos llegan al punto de mayor presión (punto de máximo contacto) ya no poseen la temperatura suficiente como para realizar una soldadura óptima por lo que el canto fundido del fleje no se mezcla correctamente y la soldadura no presentará la resistencia necesaria para soportar los ensayos estándar de fabricación.

Por lo que, con esta información, tendremos que el punto óptimo para la realización de la soldadura será en el punto intermedio entre el centro de los 2 ejes de los rodillos secundarios de soldadura, pudiendo presentar una ligera desviación en la posición X a ambos lados de dicho punto.

3. Potencia de soldadura. La potencia necesaria para atravesar toda la sección a soldar, esta va a depender del espesor de material, el tipo de material y de la velocidad de línea.

Según el fabricante la potencia de soldadura tiene una relación lineal a la velocidad del proceso, de forma que a medida que se aumenta la velocidad, se debería aumentar la potencia de soldadura hasta la velocidad máxima que permita la línea de fabricación ( $\approx 25\text{m/min}$ ), y así poder utilizar el máximo potencial de la estación de soldadura siendo esta de  $8000\text{W}$ .

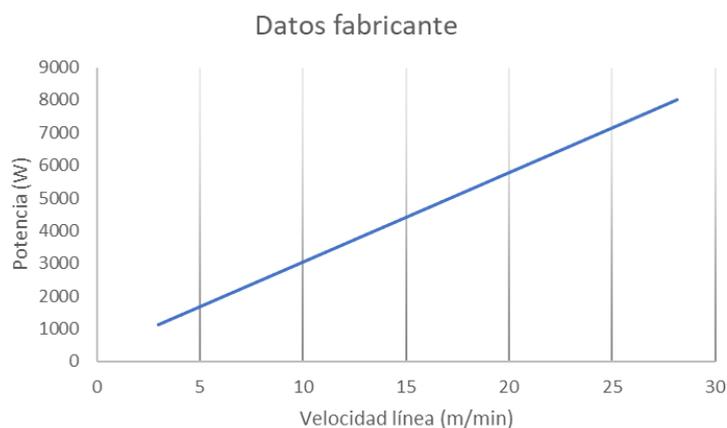


Figura IV.49 Datos del fabricante

Estos datos del fabricante son teóricos y de tratamiento general sin especificar tipo de material y espesores, por lo que se han tenido que modificar y ajustar para la soldadura de tubos con espesores menores a  $1\text{mm}$ , tras las diferentes pruebas realizadas, el ajuste inicial de parámetros sería el siguiente:



Figura IV.50 Potencia y velocidad para tubos de  $e \leq 1\text{mm}$

En el ajuste se observa un tramo lineal que comprende desde la velocidad de  $5\text{m/min}$  hasta los  $14\text{m/min}$ . Este tramo se aproxima al modelo del fabricante, al superar esta

última velocidad, si incrementamos la potencia se observa un “quemado” en la soldadura (degradado por temperatura de los granos de la soldadura) y posterior rotura. Se observó que no había necesidad de aumentar la potencia de soldadura desde los 14 a los 18m/min, ya que esa misma potencia (alrededor del 60% de la máxima) era suficiente para obtener una soldadura correcta. En el último tramo ( $V > 18\text{m/min}$ ) se observó una variabilidad en la potencia y la soldadura no fue OK. Esta variabilidad se debe al efecto Humping, que, al aumentar la velocidad de la línea se producen una especie de “crestas y valles” en el tubo que perjudican la soldadura haciéndola NOK, ya que no soporta los ensayos de fabricación.

4. Gases de protección. Son los gases que se utilizan para proteger a la soldadura frente a fenómenos de oxidación, en este caso se puede utilizar, Argón ( $\text{Ar}_2$ ), o Helio ( $\text{He}_2$ ), o mezcla de los dos, esto depende de la potencia que se utilice. Además de la correcta adecuación y guiado a través de la tobera.

Con el fin de evitar la oxidación intergranular durante el proceso de soldadura la zona de soldadura se cubre con un gas protector inerte. Este gas puede ser Argón, Helio o una mezcla de ambos. Debido al poder refrigerante que tiene el Helio se opta por utilizar Argón como gas protector para tubos con  $e < 2\text{mm}$ . Para tubos con espesores igual o mayores de 2mm se utiliza una mezcla de ambos para que el Helio contenido en la mezcla ayude a la refrigeración de la soldadura en estos tubos.

5. Estado de los bordes de soldadura

El proceso de conformado del tubo requiere de aceites lubricantes o taladrinas, que hagan las funciones de disipar el calor generado en la deformación en frío del material, y además actúen como lubricantes.

Estos elementos son un gran problema para un proceso de soldadura láser, ya que, si los bordes llegan con humedad, restos de aceite o alguna partícula de suciedad, generan discontinuidades en el proceso de soldadura, y esas discontinuidades son puntos críticos por donde el material va a fallar.

Para ello se requieren que los bordes de soldadura estén libres de imperfecciones, secos, sin restos de taladrinas, aguas o aceites, y en Flinsa esto se ha conseguido en primer lugar colocando de forma estratégica los elementos por donde sale la taladrina hacia la banda a deformar, segundo para asegurar el secado y limpieza de los bordes se han instalado, una cortina de aire comprimido además de un secador con capacidad de llegar a los  $900^\circ\text{C}$  para eliminar los restos de aceite que hayan podido llegar antes de la soldadura.

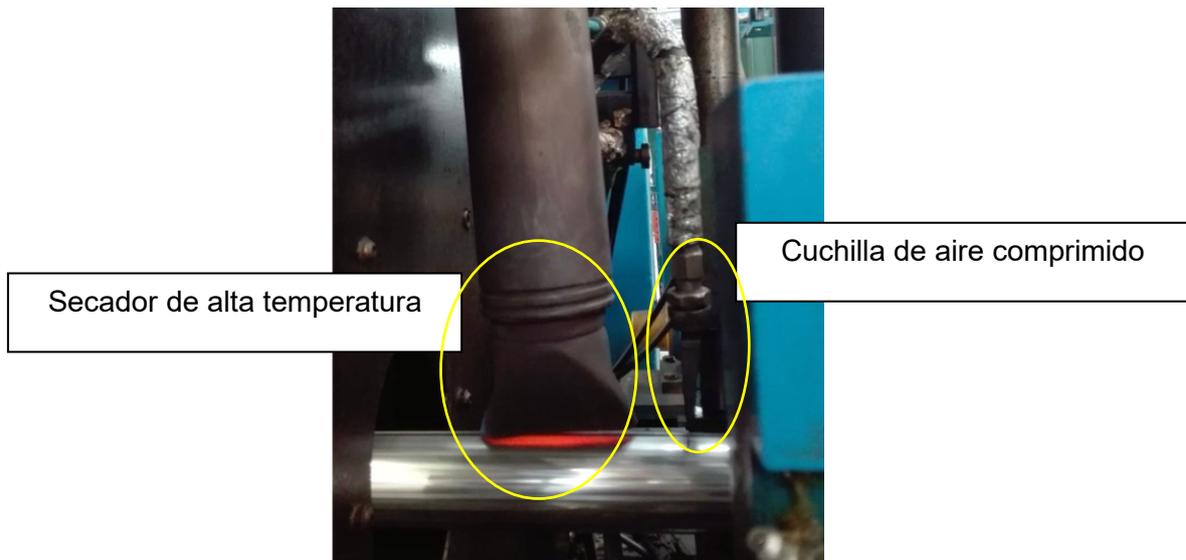


Figura IV.51 Elementos utilizados para limpieza y secado de bordes.

Cuando todos los parámetros críticos están controlados y han sido validados, se procede a elaborar un estándar de trabajo donde se recoge toda la información para poder replicar la configuración de los diferentes elementos, utillajes, etc., a lo largo de toda la máquina.

Ejemplo de estándar donde se recogen valores críticos de procesado.

Ø40 x 0,8 mm			Ø45 x 0,8 mm			Ø50 x 0,8 mm			Ø55 x 0,8 mm			Ø60 x 0,8 mm					
TORRE	PASO	LATERAL	TORRE	PASO	LATERAL	TORRE	PASO	LATERAL	TORRE	PASO	LATERAL	TORRE	PASO	LATERAL			
TORRE 1	120	175	TORRE 1			TORRE 1			TORRE 1	Muy suave		TORRE 1		Muy suave			
LATERAL 1-2	Ajustado sin apretar		LATERAL 1-2			LATERAL 1-2		76,53	LATERAL 1-2	Al tope del rodillo		LATERAL 1-2		Al tope			
LATERAL 2-3	Ajustar y soltar ligeramente		LATERAL 2-3			LATERAL 2-3		91,15	LATERAL 2-3	Muy suave		LATERAL 2-3		Al tope			
LATERAL 3-4			LATERAL 3-4		Acompañamiento	LATERAL 3-4		91,2	LATERAL 3-4	Muy suave		LATERAL 3-4		Al tope			
LATERAL 4-5	Suave, sin luz por debajo		LATERAL 4-5		83,29	LATERAL 4-5		97,24	LATERAL 4-5	Suave 1	70,53	LATERAL 4-5		65,91			
LATERAL 5-6	Muy suave, línea de luz		LATERAL 5-6		101,3	LATERAL 5-6		108,15	LATERAL 5-6	Suave	89,85	LATERAL 5-6		Msuave			
LATERAL 6-7	Solo toca el borde sup		LATERAL 6-7		105,99	LATERAL 6-7		101,97	LATERAL 6-7	Msuave	98,31	LATERAL 6-7		96,3			
LATERAL 7-8	Ajustado suave		LATERAL 7-8		112,83	LATERAL 7-8		106,8	LATERAL 7-8	Msuave	108,23	LATERAL 7-8		Msuave			
TORRE 8	60,5		TORRE 8		22,89	TORRE 8		74,9	TORRE 8		87,79	TORRE 8		92,71			
LATERAL 8-9		19,7	LATERAL 8-9		116,05	LATERAL 8-9		104,11	LATERAL 8-9		110	LATERAL 8-9		108,18			
TORRE 9	60,5		TORRE 9		21,8	TORRE 9		73,95	TORRE 9		86,52	TORRE 9		91,27			
LATERAL 9-10		19,9	LATERAL 9-10		117,28	LATERAL 9-10		107,94	LATERAL 9-10		112,11	LATERAL 9-10		108,74			
TORRE 10	60,5	19,9	TORRE 10		20,4	TORRE 10		71,15	TORRE 10		85,05	TORRE 10		89,4			
CABEZAL			CABEZAL			CABEZAL		86,97	P11		83,58	P11		88,27			
medidas	ØA	52,95	medidas	ØA	45,6	medidas	ØA	50,8		medidas	ØA	55,6		ØA	61,26		
	ØB	51,75		ØB	46,35		ØB	50,85			ØB	56,35		ØB	60,33		
Presiones	par 1	77	Presiones	par 1	88,1	Presiones	par 1	93,5		Presiones	par 1	109,5		par 1	109,7		
	par 2	76,95		par 2	88,9		par 2	94,8			par 2	100,1		par 2	109,7		
TWISTER			TWISTER		18,74	TWISTER		117,75		TWISTER		-		TWISTER			
TORRE 11	60,2		TORRE 11		73,29	TORRE 11		77,99		TORRE 11		-		TORRE 11			
LATERAL 11-12		20,6	LATERAL 11-12		118,45	LATERAL 11-12		115,87		LATERAL 11-12		114,69		LATERAL 11-12			
TORRE 12	60,2		TORRE 12		75,26	TORRE 12		80,06		TORRE 12		83,94		TORRE 12			
LATERAL 12-13		20,5	LATERAL 12-13		118,88	LATERAL 12-13		116,19		LATERAL 12-13		114		LATERAL 12-13			
TORRE 13	60,4		TORRE 13		73,15	TORRE 13		78,19		TORRE 13		84,33		TORRE 13			
LATERAL 13-14		20,5	LATERAL 13-14		118,96	LATERAL 13-14		116,52		LATERAL 13-14		114,9		LATERAL 13-14			
TORRE 14	60,3	20,5	TORRE 14		73,05	TORRE 14		78,24		TORRE 14		83,82		TORRE 14			
medida ØA	40,15		medida ØA		45,28	medida ØA		50,08		medida ØA		55,03		medida ØA			
medida ØB	40,08		medida ØB		44,02	medida ØB		50,09		medida ØB		55,01		medida ØB			
CT1			CT1		-0,35	+12,25	Corrección			CT1				CT1			
CT2			CT2							CT2				CT2			
CT3			CT3							CT3				CT3			
CT4			CT4							CT4				CT4			
LASER	pos X / Z	92,6	99,9	78,73				99,75	84,24	LASER	pos X / Z	100,06	86,61	LASER	pos X / Z	100,27	92,52
	Q gas (l/mi)	20	22					29			Q gas (l/mi)	32	38		Q gas (l/mi)	38	
	% VEL	48%	44%					44%			% VEL	44%	44%		% VEL	43%	44%
Regulación láser	% pot 1 / 2	2603	2705					2764			% pot 1 / 2	2810	2990		% pot 1 / 2	2990	

Descripción del estándar de regulación de máquina para un tubo de D 45mm con un espesor de 0.8mm en calidad 1.4512

Ø45 x 0,8 mm			PASO	LATERAL
TORRE 1				
LATERAL 1-2				
LATERAL 2-3				
LATERAL 3-4		Acompañamiento		
LATERAL 4-5		83,29		
LATERAL 5-6		101,3		
LATERAL 6-7		105,99		
LATERAL 7-8		112,83	Dibujo	
TORRE 8		22,89		
LATERAL 8-9		116,05		
TORRE 9		21,8		
LATERAL 9-10		117,28		
TORRE 10		20,4		
CABEZAL				
medidas	ØA	45,6		
	ØB	46,35		
Presiones	par 1	88,1		
	par 2	88,9		
TWISTER		18,74		
TORRE 11		73,29		
LATERAL 11-12		118,45		
TORRE 12		75,26		
LATERAL 12-13		118,88		
TORRE 13		73,15		
LATERAL 13-14		118,96		
TORRE 14		73,05		
medida ØA		45,28		
medida ØB		44,02		
CT1		-0,35	+12,25	Corrección
CT2				
CT3				
CT4				
LASER	pos X / Z	99,9	78,73	
	Q gas (l/mi)	22		
	% VEL	44%		
Regulación láser	% pot 1 / 2	2705		

Parámetros para el control de regulación de la máquina,  
 Posiciones de rodillos de soldadura  
 Ø de entrada a la soldadura  
 Configuración cabezas de turco para el enderezado

Parámetros críticos de soldadura:  
 Posición focal + Posición X  
 Velocidad de procesado  
 Potencia de trabajo  
 Regulación del gas protector

Figura IV.52 estándar de trabajo.

Inconvenientes aparecidos:

### A. Inestabilidad del borde de fleje

Durante el desarrollo del trabajo apareció una situación no prevista que se han tenido que solventar.

Inestabilidad de los bordes, produciéndose movimientos relativos entre los 2 bordes a soldar, generando soldadura nok.

La situación se podía mitigar bajando la velocidad de procesado, pero la compañía estaría en desventaja competitiva aún mayor de la que tiene ahora ya que el procesado de soldadura láser no supera los 20M/min, frente a los 50-60m/min que mantienen las soldaduras mediante alta frecuencia, así que ese camino se desechó, de modo que se hizo necesario buscar otra alternativa donde la velocidad no se viera reducida.

Se plantearon varias situaciones:

- Sujeción del borde con un elemento interior.
- Sujeción del borde con un elemento exterior.

Para la sujeción interior se diseñó una lanza que sujetara el fleje contra los primeros rodillos de soldadura

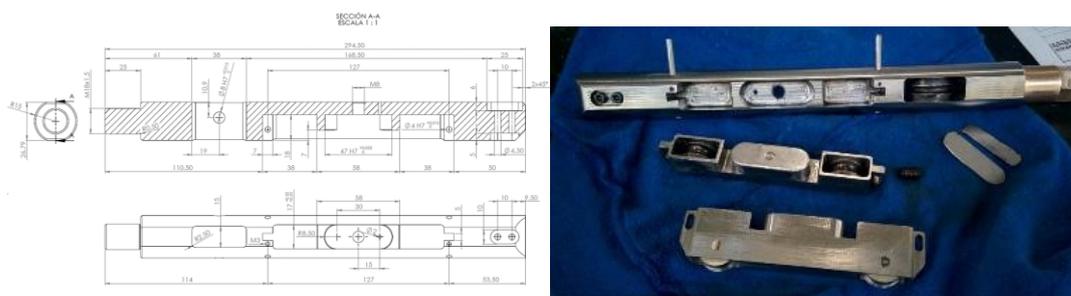


Figura IV.53 Elementos sostenedor interior borde de fleje.

Se realizó una primera prueba en una fabricación de diámetro  $\varnothing 45\text{mm}$  con fleje de espesor 0,8mm, usando la base mecánica pequeña. Se instaló el útil de ensamblaje en la conformadora de la máquina para anclar la varilla (utillaje de unión con la máquina) que iría alojada en el interior del tubo). Para poder sujetar la varilla al útil de ensamblaje (utillaje interior del tubo) se utilizó una pieza de unión diseñada específicamente para tal fin.



Figura IV.54 Útil de ensamblaje instalado en la conformadora de la máquina.



Figura IV.55 Útil de unión entre el sostenedor de cantos y el útil de ensamblaje.

Una vez montado en sistema, el sostenedor de cantos se ubica entre los rodillos del cabezal de soldadura, a pocos milímetros del punto donde incide el haz láser para realizar la soldadura en el interior del tubo. Además, en la figura inferior se observa el detalle de la pastilla de acero 1.2379 HRC62 templado que será la pieza que presione los bordes del fleje contra los rodillos del cabezal de soldadura, y así mediante esta sujeción física lograr aumentar la estabilidad de los bordes en el proceso de soldadura.



Figura IV.56 Sostenedor de cantos posicionado entre los rodillos del cabezal de soldadura.

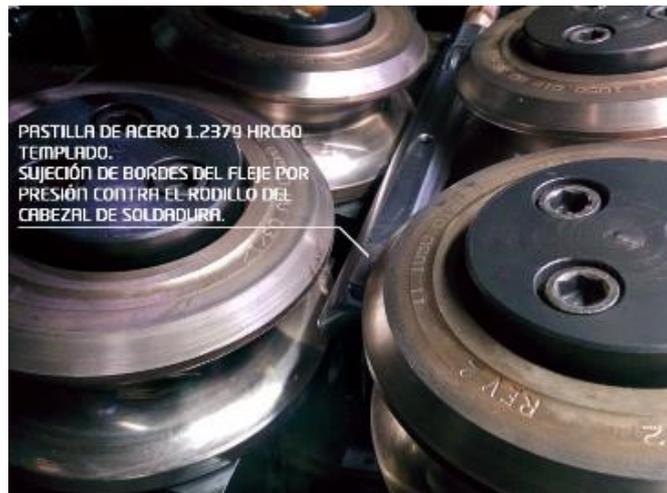


Figura IV.57 Detalle de la pastilla Sostenedor de cantos posicionado entre los rodillos del cabezal de soldadura.

Se realizaron 2 pruebas de fabricación utilizando el sistema sostenedor de cantos con tubo de  $\varnothing 45\text{mm}$ . En las siguientes imágenes se observa la posición de la varilla sostenedor de cantos en el interior del tubo.



Figura IV.58 Detalle del Sostenedor de cantos posicionado en el interior del tubo.

En una primera prueba de fabricación realizada durante 3-4 horas, se observó cómo tanto las ruedas de la base como la propia pastilla realizaban unas marcas profundas

en el interior del tubo dejándolo este no apto según especificaciones para la aplicación a la que iba destinada. Para tratar de evitar estas marcas, lo que se hizo fue reducir la presión interna que ejercía la varilla sostenedora sobre el tubo, mediante la rosca de control de altura que disponía la varilla, pero aun con el mínimo contacto se producían marcas internas por las ruedas o en la pastilla de acero. El calor generado por la soldadura era tal que, por las marcas aparecidas en el tubo, parecía que las ruedas de la base se dilataran y se quedasen amarradas en la base marcando el interior del tubo. Al disminuir la presión hasta eliminar las marcas se observó que la varilla no ejercía presión alguna en el interior del tubo y la inestabilidad de los bordes aumentó.

En una segunda prueba realizada con una duración de 2-3 horas, se optó por introducir un pequeño caudal de taladrina en el interior del tubo para tratar de lubricar y refrigerar la varilla por entero, en primer lugar, para evitar el gripado de las ruedas de la base y, en segundo lugar, para que el contacto entre la varilla y el interior del tubo no generase surcos, arañazos o hendiduras que perjudicasen al tubo.

Esta prueba no fue satisfactoria. El caudal de taladrina no fue suficiente para disipar el calor en la varilla que era generado por la soldadura, y aumentar dicho caudal significaría un aumento en la humedad del borde del fleje, lo que provocaría fallos de soldadura al quedar atrapadas partículas de agua en la línea de fusión. En esta prueba el tubo resultante volvía a contener marcas y surcos en el interior del mismo. Además, el aceite que contenía la taladrina se degradaba con el calor generando un residuo aceitoso en el interior del tubo que había que eliminar posteriormente.

Puesto que ambas bases para diámetros pequeños tenían que repararse para volver a utilizarse, se decidió continuar con las pruebas utilizando la base para tubos de diámetro grande, por lo que se realizaron pruebas en tubo de Ø60mm.

Se realizaron 2 puestas en marcha con este útil para un tubo de Ø60x0.8mm, cada una de ellas de unas 4-5 horas de duración. En estas pruebas se utilizó la base del sostenedor de cantos para tubos de grandes diámetros, y en este caso, para evitar el amarre de las ruedas con la base se impregno la misma con una grasa resistente a la temperatura.

En una primera prueba se observó que, para estos tubos de tan gran diámetro, la pastilla de acero de soporte al colocarla a pocos milímetros ( $\approx 2-3$  mm) del punto donde se producía la soldadura no se realizaba de forma correcta el enfrentado de los bordes del fleje. Se apreciaba que a mayores diámetros la inestabilidad del fleje aumentaba incluso en pequeñas distancias, por lo que se tuvo que regular longitudinalmente el sistema de sostenedor de cantos de forma que la soldadura se realizara en la parte final de la pastilla de soporte.



Figura IV.59 Detalle del punto donde se realizará la soldadura en la parte final de la pastilla de soporte.

En este tubo se presentaron los mismos problemas que en las pruebas anteriores, en la parte interior del tubo se generaron unas marcas profundas en la zona de la soldadura debido al rozamiento con la pastilla de soporte. Además, debido al calor generado por la soldadura, la propia pastilla presentaba una alta degradación, con zonas oxidadas perdiendo el templado.

Tras la segunda puesta en marcha con el mismo tubo, donde se instaló una pequeña conducción de aire a la altura del utillaje de ensamblaje para refrigerar en la medida de lo posible el sostenedor de cantos, los resultados de estas pruebas no fueron satisfactorios. El caudal de aire suministrado no fue suficiente para la refrigeración de la pastilla de soporte y esta se degradó por completo debido al alto calor generado en la soldadura perdiendo por completo el estado templado de la misma. A esto hay que añadirle la tendencia creciente de aparición de marcas profundas en el interior del tubo, que hacían no apto este para la aplicación buscada. Además, la grasa resistente a la temperatura también se degradó, dejando residuos aceitosos en el interior del tubo (alta dificultad en su limpieza) (Figura 60; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Por último, durante las pruebas realizadas, debido a las grandes temperaturas a las que estuvo sometido el sostenedor de cantos, la estructura de este empezaba a verse afectada por la oxidación (Figura 61), presentando una oxidación superficial severa en la zona más próxima a donde se realizaba la soldadura (coloración dorada) y una oxidación más leve en la zona más alejada del punto de soldadura (coloración azulada).



Figura IV.60 Detalle de la degradación de la grasa resistente a la temperatura utilizada en la base con ruedas del sistema sostenedor de cantos.



Figura IV.61 Estado de oxidación del sostenedor de cantos tras la realización de las 4 pruebas realizadas.

Finalmente, como conclusión de estas pruebas realizadas, el sistema sostenedor de cantos no fue un diseño efectivo, pues, aunque favorece ligeramente la estabilidad de los bordes de fleje en la soldadura presenta ciertas dificultades y fallas que hacen que este sistema no sea favorable para la fabricación de tubos para destino a sistemas de escape. Los inconvenientes encontrados en las pruebas de este sistema son los siguientes:

- Elevadas y profundas marcas longitudinales en el interior del tubo. Estas marcas pueden actuar como concentrador de tensiones y generar roturas cuando el tubo sea sometido a esfuerzos externos en operaciones secundarias. Además, en estos surcos será zona donde se producirá oxidación intergranular por el calor de los gases de escape siendo potenciales puntos de fuga de gases tras su degradación por esta oxidación.
- Necesidad de alta lubricación en las ruedas de las bases. Debido al extremo calor generado por la soldadura, el acero de las ruedas de la base se dilata, quedándose amarradas en la base sin producir el movimiento de rodadura. Por un lado, sin lubricación, el amarre de las ruedas genera marcas longitudinales profundas en la parte inferior del interior del tubo. Por otro lado, la lubricación utilizada, con el calor del proceso de soldadura, esta se degrada creando un residuo aceitoso que difícilmente puede ser eliminado del interior del tubo.
- Desgaste de la pastilla de acero de soporte. En la fabricación de tubos con diámetro grande, la pastilla de soporte debía situarse en contacto con el punto donde se realizaba la soldadura del tubo. Este contacto hacía que estuviera sujeta a muy altas temperaturas haciendo que cambiase el estado de temple de la pieza por lo que se generaba una oxidación y un desgaste tal que producía marcas en la zona interna de la ZAT, pudiendo afectar a la integridad de la soldadura.
- Oxidación intergranular de la varilla del sostenedor de cantos. Con las altas temperaturas, se realizó una oxidación intergranular del material de la superficie

de la varilla, de forma severa en la zona más próxima a la soldadura (coloración dorada) y de forma más leve en la zona alejada de la soldadura (coloración azulada). Esta oxidación, inicialmente superficial, se produjo por las elevadas temperaturas del proceso de soldadura. Con el uso de la misma, esta oxidación llegaría a toda la sección de la varilla provocando desgastes y la rotura de la propia varilla.

Tras todas estas pruebas no satisfactorias, se cambió el tipo de apoyo de interior a exterior.

Tras el diseño del rodillo de aplastado de bordes, se fabricó en acero 1.2379 y se le realizó un tratamiento térmico de templado para endurecer la superficie de este. Con ello, su buscaba evitar que se pudieran generar marcas en el tubo durante la utilización de este utillaje.



Figura IV.62 Rodillo de aplastado de bordes y soporte de rodillo.

Para la instalación del rodillo aplastador se pretendió que su posición estuviera lo más cercana posible al cabezal de soldadura, pero sin que se viera afectado por la radiación térmica del proceso de soldadura, por ello, se aprovechó de un soporte para que, ubicado en el interior de la Cabina de soldadura, pudiera albergar el rodillo.

Así pues, dentro de la Cabina de soldadura, al inicio de esta se instaló el soporte con el rodillo, ajustado para la circunferencia más amplia del rodillo (centro de la anchura del rodillo) coincidiera con la línea que llevarán los bordes de soldadura al entrar en la misma (61).



Figura IV.63 Cabina de soldadura láser con soporte del rodillo aplastador instalado a su derecha.

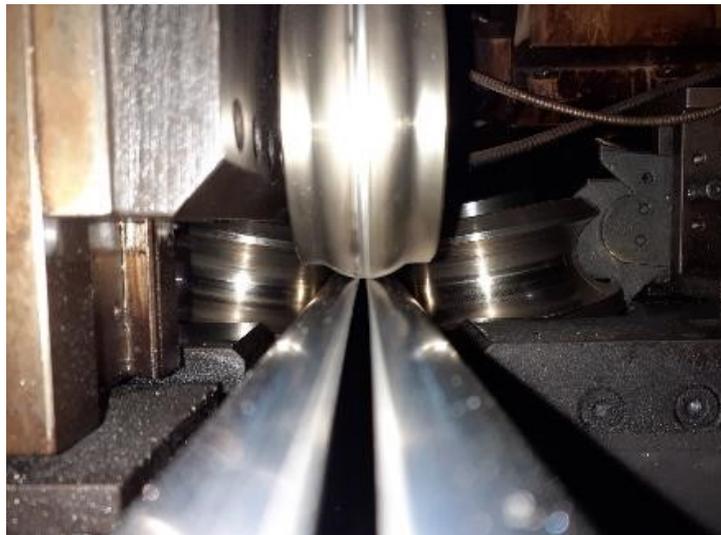


Figura IV.64 Posición del rodillo aplastador de bordes sobre el tubo antes de soldarse.

Con el rodillo aplastador de bordes correctamente instalado y regulado se realizó una prueba de fabricación con un tubo de dimensiones  $\text{Ø}55 \times 0,8 \text{ mm}$ .



Figura IV.65 Soldadura del tubo 55x0.8 calidad 1.4512. - Tubos 55x0,8mm del inicio de la fabricación.

Esta prueba fue de larga duración, se quiso comprobar el correcto funcionamiento del rodillo aplastador, así como su estado tras un elevado tiempo de trabajo. Además, estas pruebas sirvieron para que, una vez el rodillo aplastador estuviera ajustado finamente con el tubo, aumentar poco a poco la velocidad de trabajo de la línea hasta llegar al punto donde se perdiera la estabilidad de los bordes de fleje y se empezara a manifestar problemas de soldadura por esta falta de estabilidad.

Así se puede decir que el problema de la inestabilidad de los bordes fue solucionado con un diseño de elemento sujeta bordes exteriores que se colocó justo antes de los primeros rodillos de soldadura, con esto se consiguió la estabilidad necesaria para que los bordes no se movieran al realizar la operación de soldar.

## B. Efecto Hum ping

Otro inconveniente que apareció fue el fenómeno del efecto humping, este fenómeno limita la velocidad de procesamiento mediante las técnicas de soldadura láser, en concreto, se generan irregularidades en el material soldado, produciendo resaltos seguidas de depresiones, incluso pudiendo llegar a generarse poros. Estas irregularidades son debidas a la física de enfriamiento y avance del material a través de la zona de soldadura.

Hay gran número estudios desde 1968 intentando dar solución a este fenómeno, pero hasta el momento no se ha conseguido dar con ella, estando centrados en determinar modelos matemáticos que simulen o predigan cual es la velocidad máxima en función a parámetros específicos.

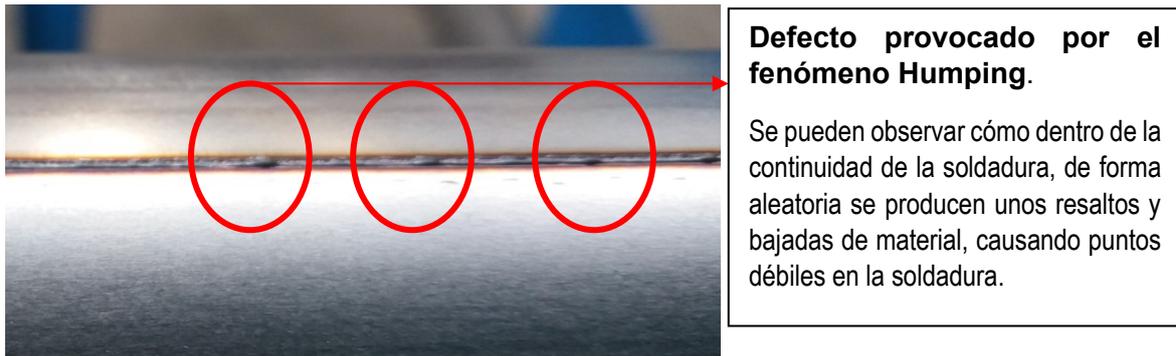


Figura IV.66 Efecto humping.

Estos defectos si los aumentamos se pueden ver lo siguiente:



Figura IV.67 defectos producto de la velocidad de proceso.

Este efecto se puede suavizar haciendo un pretratamiento térmico a la entrada de la soldadura, en Flinsa se hace con el sistema de limpieza de bordes. Este es un secador de alta potencia con temperaturas de evacuación superiores a los 600 °.

El efecto humping aún no está perfectamente estudiado, y hay fenómenos que se siguen escapando, aunque hay bastantes grupos de investigación trabajando en el camino para un mejor entendimiento, aún no se termina de entender perfectamente el fenómeno.

Hay un gran número de modelos que siguiendo la teoría de investigaciones de Rayleigh en la estabilidad de un fluido incompresible no viscoso que está suspendido libremente en el espacio y se mantiene sólo por la tensión superficial. Haciendo simulaciones pero que no terminan de dar un resultado perfectamente adecuado, o describir todo lo bien que se espera el fenómeno, también hay otras variables como la estabilidad del plasma, los vapores de la soldadura, etc., que afecta de alguna manera y hay que encontrar el cómo se pueden relacionar.

### 1.3 Análisis Medio – condiciones ambientales.

La última etapa que queda por abordar es el entorno de trabajo, las condiciones ambientales en las que se desarrolla la actividad.

## Rotura de soldadura aleatorio

### Medio

- Tª ambiente
- Calidad del aire comprimido
- % de humedad en planta
- Posibilidad de absorción de nitrógeno, hidrógeno del ambiente por condiciones del momento.

En este apartado se analizan las condiciones externas que puedan influir en el proceso de soldadura, para lo cual es sabido por diferente información bibliográfica, que cuando se está ejecutando la soldadura mediante proceso láser se debe tener:

- El borde de soldadura perfectamente limpio. (libre de grasas, aceites, elementos extraños)

No es posible del todo garantizar esta premisa, aunque se ha trabajado para que así sea.

Todo el sistema de guiado del rayo láser está presurizado con aire comprimido de línea general, este aire impacta directamente en la zona de soldadura, y no llega perfectamente limpio, así que para reducir problemas de contaminación se ha mejorado la instalación añadiendo estos 2 compones, para filtrar todo el aire que sale del sistema de guiado del rayo láser.

- Filtros micrónicos
- Secador de aire.



Figura IV.68 Filtros aire comprimido Atlas copo



Figura IV.69 Secador de aire

Con estos dispositivos se elimina casi toda la humedad que puede llegar a la zona de soldadura en más de un 99%, además de eliminar pequeñas partículas se encuentren en la instalación de aire comprimido.

Otra causa que genera suciedad en los bordes del fleje son los mínimos restos de taladrina que puedan llegar del conformado de tubo hasta la soldadura debido a que los elementos que deben eliminarlos no son eficaces al 100%, esto son la cuchilla de aire comprimido, este aire también es tratado por los filtros, y un secador de alta potencia con temperaturas de salida de aire de más de 600°C, que por la velocidad del proceso no termina de eliminar los restos más pequeños de aceites o humedad.



Figura IV.70 Cabina de soldadura

La humedad ambiente también es un factor para tener en cuenta, ya que dentro de la cabina de soldadura no hay un aislamiento estanco y perfecto, ni una atmosfera totalmente inerte, debido a que el tubo atraviesa la cabina perdiendo en esta zona la estanqueidad. El interior del tubo tampoco está libre de restos de taladrina. Aunque si se protege la soldadura con gas Argón.

Por todo ello, se piensa que una vez se tienen todos los parámetros de procesos ajustados y optimizados, la única causa posible que siga actuando para hacer una soldadura frágil al terminar el proceso de soldado es la aparición de hidrógeno o nitrógeno que quede atrapado en la soldadura cuando esta solidifica, producto de la descomposición de los restos de elementos que llegan a la soldadura, o el nitrógeno que es captado del ambiente.

El hidrógeno se puede introducir en la soldadura desde varias fuentes. Éstas pueden ser:

- hidrógeno en el material base original,
- Humedad en el ambiente,
- Contaminantes orgánicos (grasa o aceite),
- Hidrógeno en el gas de protección,
- En ocasiones la humedad de la atmósfera.

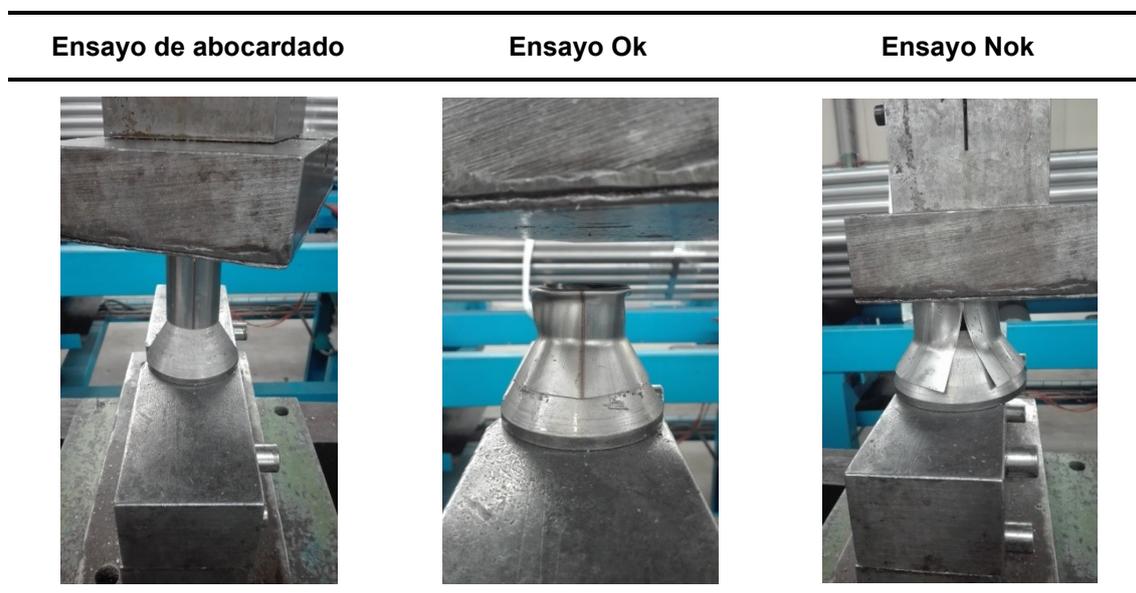
El hidrógeno puede ser asimilado de cualquier de los estados anteriores, a través del baño de soldadura fundida, porque este tiene una mayor solubilidad en estado líquido que en sólido (particularmente hierro y aluminio). Después de la solidificación, la difusividad del hidrógeno en la microestructura es extremadamente alta y el hidrógeno se difunde a favor de un gradiente de concentración en la ZAT.

### 1.3.1 Desarrollo experimental para eliminar el hidrógeno.

Hay una alta probabilidad donde la causa fundamental por la que la soldadura del tubo se rompa al someterla a un esfuerzo mecánico pueda ser debido a la difusión de hidrógeno del medio en el que se produce la soldadura hacia el interior de esta, quedando atrapado cuando solidifica el material debido a su rápido enfriamiento.

Para establecer un método operativo que ayude al operario a eliminar la incertidumbre y quitar las variables de proceso de la posible causa de rotura de la soldadura se diseñó un experimento, este consiste en:

1. Dejar pruebas testigo de 1.5m de distancia de todos los objetos fabricados durante un lote controlado.
2. Trocear 25 trozos de cada testigo serán sometidos al ensayo de expansión, y dejar 500mm para realizarle el ensayo de aplastado a 0° y 90° respecto a la soldadura.
3. Hacer los ensayos destructivos cada 4h para ver cuál es la evolución de la posible difusión.



En la tabla superior se pueden ver las imágenes de que es un ensayo de abocardado ok y cual Nok, para superar la prueba y ser ok el ensayo no puede apreciarse ningún defecto en la soldadura, cualquier pequeña fisura es un ensayo Nok.

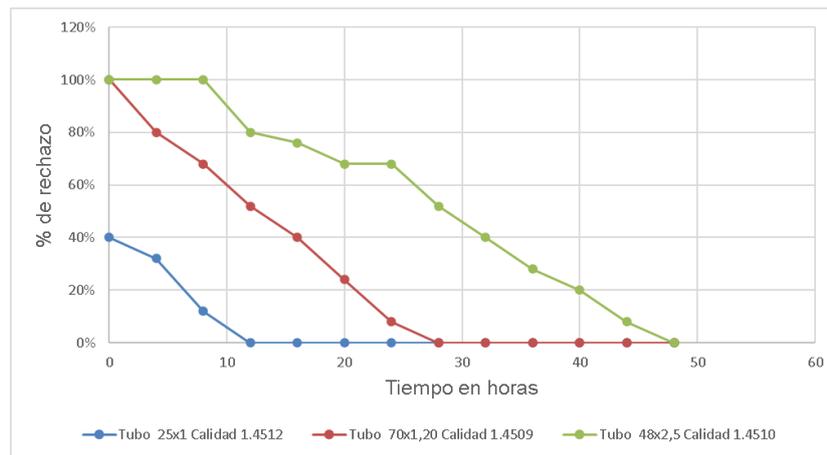


Figura IV.71 Evolución gráfica del porcentaje de rechazo con el tiempo.

Este mismo experimento, se replicó en varias ocasiones, con resultados similares, según se observa en la gráfico superior el material menos susceptible del efecto de fragilización es el 1.4512, siendo razonable, ya que, a mayor porcentaje de Cromo, hay una mayor facilidad para sufrir el fenómeno de fragilización, además también se observa, que el espesor es muy influyente en el fenómeno de fragilización, esto puede ser debido a que necesita mayor potencia para ser soldado y la velocidad de producción es menor si la comparamos con espesor 1mm, de modo que se pueden liberar más cantidad de hidrógeno de la zona de la soldadura y este quedarse atrapado en ella.

Para confirmar si se está en lo correcto, se rediseña el experimento acelerando el proceso de difusión con una estufa de gas butano,



Figura IV.72 Calentamiento de probetas con estufa de butano.

El desarrollo experimental es igual que en el caso anterior, sólo cambia el proceso de realizar el ensayo destructivo tras calentar la probeta durante un tiempo determinado en la estufa, el experimento queda con la siguiente estructura:

1. Dejar pruebas testigo de 1.5m de distancia de todos los objetos fabricados durante un lote controlado.
2. Trocear 25 trozos de cada testigo serán sometidos al ensayo de expansión, y dejar 500mm para realizarle el ensayo de aplastado a 0° y 90° respecto a la soldadura.
3. Realizar ensayos destructivos después de haber sometido a temperatura a las probetas del siguiente modo:
  - a. Sin calentar.

- b. 30s de permanencia en la estufa.
- c. 60s de permanencia en la estufa.
- d. 90s de permanencia en la estufa.

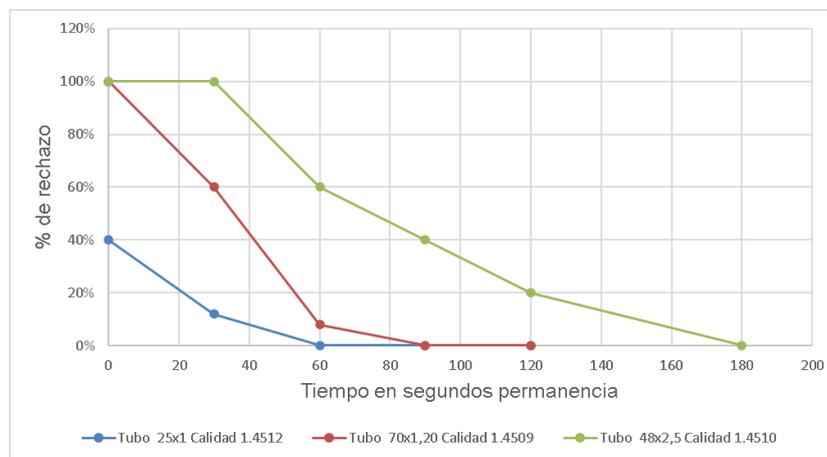


Figura IV.73 Evolución gráfica del porcentaje de rechazo con el tiempo de permanencia en estufa.

El experimento confirma lo que se ha concluido con el primer desarrollo, por lo que se puede decir que el porcentaje de Cromo y el espesor son factores que afectan al fenómeno de fragilización por hidrógeno.

En base a estos dos experimentos se plantea la posibilidad de hacer un tratamiento térmico en línea que ayude a eliminar el posible hidrógeno de la zona ZAT, y así tener la seguridad de soldadura ok desde el momento de la puesta en marcha del proceso, para cual se realiza un diseño de un equipo de tratamiento térmico, el sistema diseñado se denominó "horno túnel" tiene la función de calentar la soldadura y sus inmediaciones mediante aire calentado por una resistencia. Este aire es generado por una turbina *ROBUST Soplante de alta presión* que es conducido a través de una resistencia *LE 5000 HT* calentándose para posteriormente ser expulsado por una boquilla alojada en un orificio en contacto con la carcasa exterior del horno túnel. A través de este orificio, situado a pocos milímetros de la superficie exterior del tubo en la zona de su soldadura, se introduce el aire caliente a temperatura regulada con un potenciómetro externo. Este aire caliente incide directamente sobre la soldadura del tubo y sus inmediaciones calentándolo mientras el tubo se encuentra en el interior del horno, para posteriormente una vez sale del mismo enfriarse lentamente al aire.

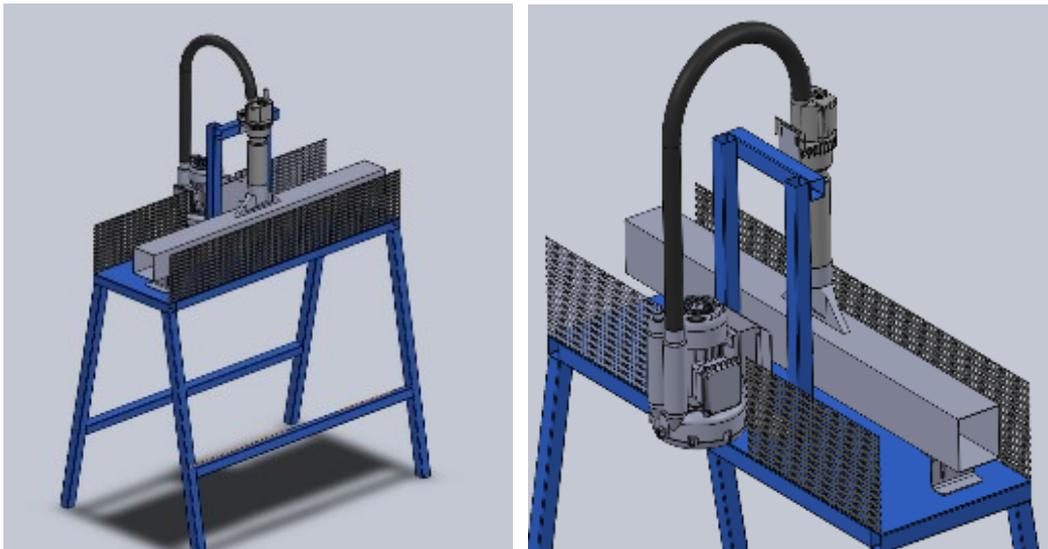
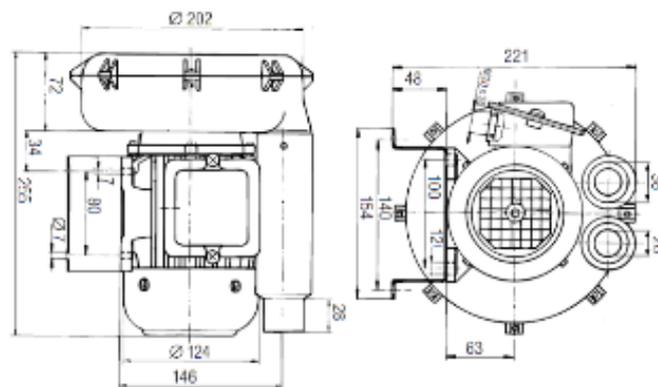


Figura IV.74 Diseño 3D del sistema horno túnel.



Figura IV.75 Turbina montada en el sistema horno túnel. Modelo: ROBUST Soplante de alta presión.



Datos técnicos ROBUST			
Tipo de construcción: Compresor de canal lateral			
Frecuencia	Hz	50	60
Caudal de aire (20 °C)	l/min	1200	1300
Presión estática	kPa	8.0	10.5
Máxima temperatura ambiente	°C	60	60
Máxima temp. de entrada de aire	°C	60	60
Nivel de emisión de ruido	dB(A)	62	62
Tipo de protección (IEC 60529)		IP 54	IP 54
Abertura de aspiración (ext.)	mm	∅ 38	∅ 38
Abertura de soplado (ext.)	mm	∅ 38	∅ 38
Peso	kg	8.0	8.0
Marca de conformidad		CE	CE
Clase de protección I		⊕	⊕
Se puede accionar con FC (página 62), 20 – 60 Hz			

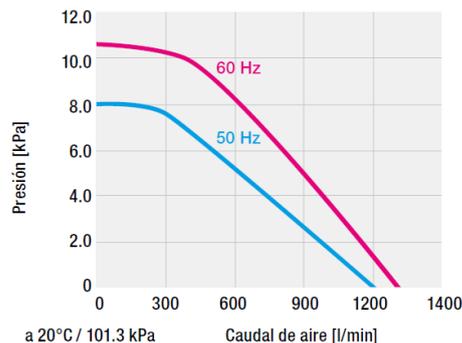
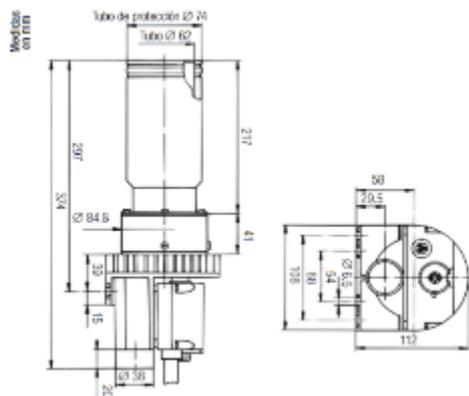


Figura IV.76 Medidas y Datos técnicos de la turbina ROBUST Soplante de alta presión



Figura IV.77 Resistencia montada en el sistema horno túnel. Modelo: LE 5000 HT.



Datos técnicos	
Alta temperatura LE 5000 HT	
Sin electrónica de potencia integrada	•
Tubo calentador con protección	•
Máxima temperatura de salida de aire	°C 900
Mínimo caudal de aire	NI/min 600
Máxima temperatura de entrada de aire	°C 100
Máxima temperatura ambiente	°C 100
Peso	kg 2.25
Marca de conformidad	CE
Clase de protección I	⊕
Flujo de aire mínimo a 20 °C de temperatura de entrada de aire	
NI = litros normalizados según norma DIN 1343	

Figura IV.78 Medidas y Datos técnicos de la resistencia LE 5000 HT.

La primera prueba realizada con el horno túnel tiene como objetivo establecer cuál sería la temperatura que marcaría el potenciómetro, ya que éste solamente indicaba la intensidad numérica y no la temperatura a que estaba saliendo el aire. Por ello, con la ayuda de un termómetro de aguja introducido levemente entre la boquilla y el horno túnel se fue midiendo la temperatura en relación con la intensidad seleccionada.



Figura IV.79 Potenciómetro selector de la resistencia del horno túnel

En esta prueba, para la determinación de la temperatura del aire en función de la posición del selector del potenciómetro, la operativa seguida fue la siguiente:

1. Tras poner en marcha el rotor de la turbina, se coloca a 0 el selector.
2. Con el selector en posición 0, se da corriente a la resistencia con el interruptor del armario de térmicos.
3. Se aumentaba 1 posición el selector y se espera entre 5-10 minutos a que la resistencia alcance una temperatura continua y constante. Anotando en ese momento esa temperatura.
4. Se repitió el paso 3 hasta la posición del selector 6.

En esta primera fabricación solamente se pudo alcanzar la posición 6 del selector debido a la finalización de la materia prima disponible y cambio de orden de trabajo, con lo que hubo que parar la máquina para realizar un cambio en el utillaje dispuesto para la fabricación de tubo con otra dimensión. La temperatura que generaba la resistencia era medida mediante un termómetro digital con cánula de 20 cm y un termopar alojado en su punta. Esta fina punta de la cánula del termómetro se introdujo entre la boquilla y el horno túnel para registrar la temperatura a la que se encontraba el interior del horno túnel.



Figura IV.80 Interruptor térmico de corriente de la resistencia del sistema horno túnel.



Figura IV.81 1ª prueba del sistema horno túnel. Tubo Ø60.



Figura IV.82 Subsistema del horno túnel. Generación de aire mediante turbina y calentamiento con resistencia.

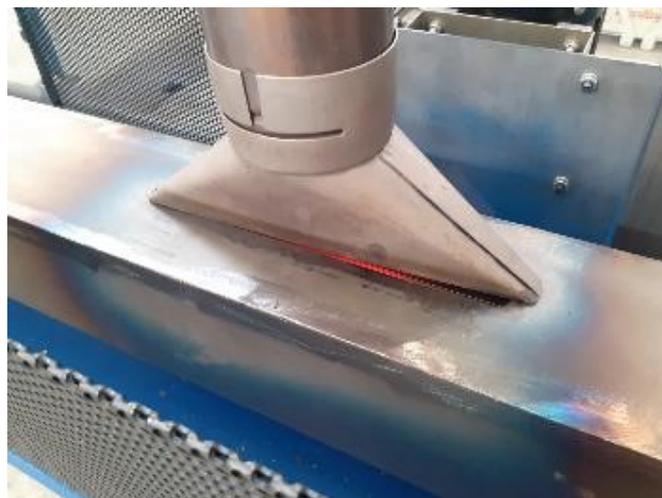


Figura IV.83 Sistema del horno túnel. Detalle de la conexión de la boquilla-horno túnel (resistencia calefactora de aire).

Los resultados de esta prueba fueron los siguientes, para cada una de las posiciones del selector la temperatura alcanzada se muestra en la tabla 26.

Tabla IV.16. Temperatura del aire en función de la posición del selector del potenciómetro.

Posición selector	Temperatura (°C)
1	55
2	180
3	275
4	330
5	520
6	630

Representando gráficamente los resultados obtenidos:

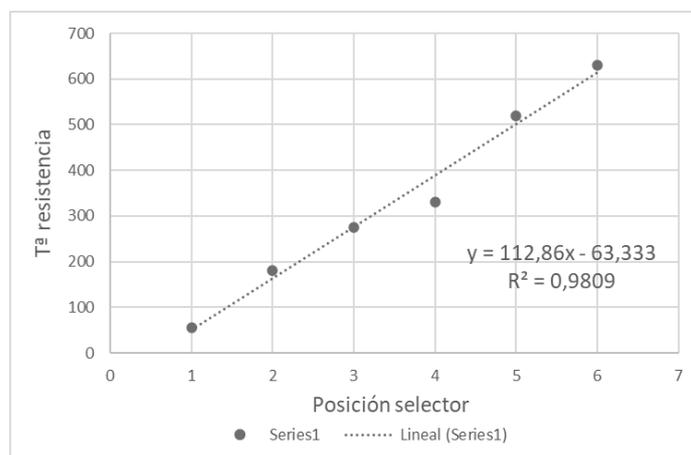


Figura IV.84 Representación gráfica de los valores del selector.

Si se aproximan los resultados a un comportamiento lineal, admitiendo que la temperatura aumenta linealmente con la posición del selector la función que describiría sería la marcada en la figura IV. 80,

$$y = 112,86x - 63,33$$

Aplicando esta fórmula al resto de posiciones del selector la temperatura para cada una de las posiciones sería la que se muestra en la

Tabla IV.17.

Tabla IV.17. Temperatura de todas las posiciones del selector de acuerdo con la función lineal de Figura 80.

Posición selector	Temperatura (°C)
1	55
2	180
3	275
4	330
5	520
6	630
7	727
8	840
9	952
10	1065

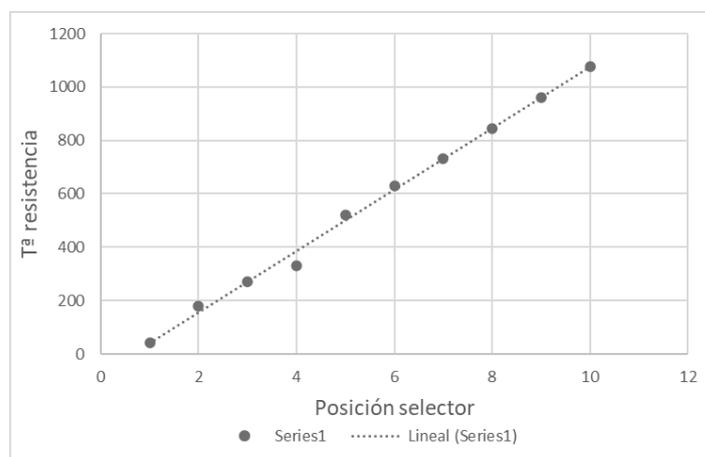


Figura IV.85 Representación gráfica de los valores calculados del selector.

Según la ficha técnica de la resistencia (Figura 78), la temperatura máxima que puede generar la resistencia son 900°C, por lo que las posiciones 9 y 10 no serían alcanzables, quedándose ambas a un máximo de 900°C tal y como indica la siguiente figura.

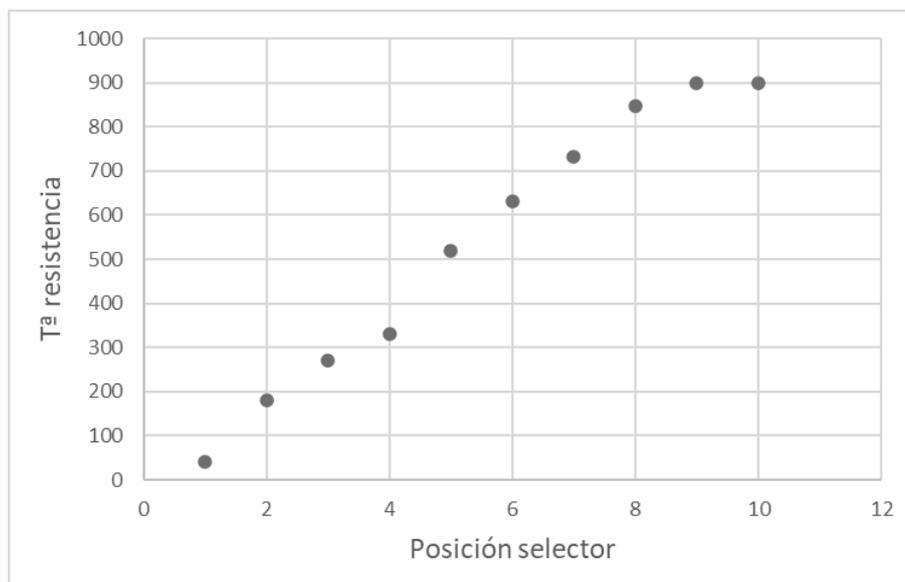


Figura IV.86 Valores finales estimados de temperatura de la resistencia en función de la posición del selector.

Tras la definición de las temperaturas según la posición del selector, se estuvieron realizando pruebas para comprobar a qué temperatura de trabajo se reducía el porcentaje de roturas en la soldadura del tubo, señal de que la temperatura aplicada a la ZAT del tubo por el horno túnel aceleraba el efecto migración de las partículas gaseosas atrapadas en la línea de forja de la soldadura. Por ello, se realizaron una serie de pruebas trabajando a velocidad constante de 9-10 m/min aumentando la temperatura de la resistencia y comprobando el porcentaje de roturas que aparecían al realizar inmediatamente los ensayos de aplastado y abocardado que marca la norma. Estas pruebas se realizaron durante varias fabricaciones, ya que para realizar una correcta comprobación tanto de que la temperatura de trabajo del horno túnel era estable, como de que la soldadura del tubo era afectada por esta temperatura, además había que realizar pruebas en cada una de las posiciones del selector de potencias, por lo que para cada temperatura la duración de las pruebas oscilaba entre 3 y 4 horas.

Durante las pruebas de temperatura, se testaron 25 probetas, espaciadas en tiempo alrededor de 8-10 minutos para cada temperatura aplicada. Las muestras eran inmediatamente ensayadas tras el proceso de fabricación, sin esperar el tiempo que Producción tiene establecido como "*tiempo de reposo*" de entre 24 y 48 horas, para que las partículas gaseosas puedan escapar de la zona de la soldadura por efectos de difusión a temperatura ambiente. Los resultados se recopilan en la siguiente tabla.

Tabla IV.18. Resultados % muestras NOK tras ensayos según norma.

Posición selector	Temperatura (C)	Muestras NOK	% Muestras NOK soldadura
1	55	25	100%
2	180	24	96%
3	275	23	92%
4	330	22	88%
5	520	20	80%
6	630	16	64%
7	727	13	52%
8	840	8	32%
9	900	-	-
10	900	-	-

Gráficamente se observa la siguiente evolución.

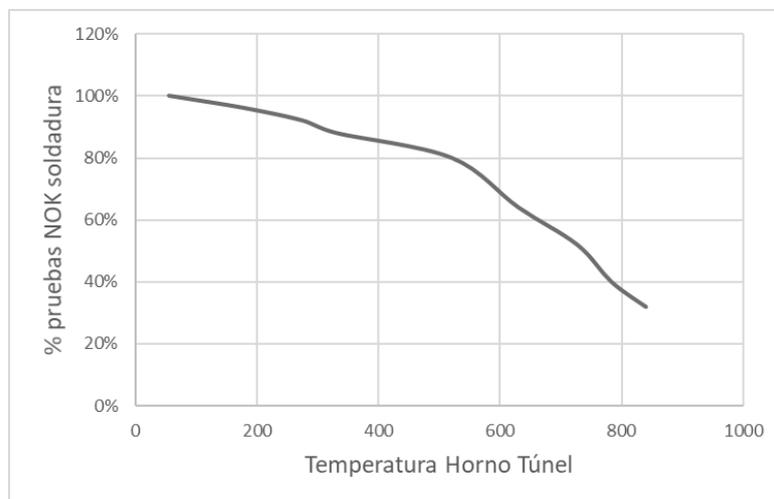


Figura IV.87 Evolución del % de roturas al realizar las pruebas de soldadura según norma de forma inmediata tras la fabricación.

Se observa una disminución en el porcentaje de las muestras NOK que resultan tras las pruebas, aunque no fue posible reducir este porcentaje a 0. Se observa que trabajando el horno a mayor temperatura la curva tiende a acentuarse y reducir en mayor medida la cantidad NOK de muestras, ello fue debido a que al aumentar la temperatura se aceleran los efectos de difusión de las partículas gaseosas retenidas en la soldadura del tubo.



Figura IV.88 Probeta con soldadura OK. Resiste el esfuerzo del ensayo de abocardado >25% sin rotura.



Figura IV.89 Probeta con soldadura NOK. Rompe la soldadura antes de alcanzar el % mínimo exigible de expansión.

Con las pruebas realizadas se observa la posibilidad de reducir hasta alrededor de un 30% de piezas NOK tras la realización de los ensayos según norma inmediatamente tras la soldadura del tubo, aunque la temperatura de trabajo para alcanzar ese porcentaje es elevada y durante la operativa de trabajo puede suponer un peligro para el operario por foco de calor y riesgo de quemaduras.

En estas sesiones de pruebas, hubo problemas trabajando con la resistencia en la posición de potencia 8 (y superiores), en el momento que se aumentó ligeramente la temperatura de trabajo del horno túnel, sobre los 10 minutos de operativa se produjo una fusión en los filamentos de la resistencia deteriorándose inmediatamente, dejando que calentar y vertiendo el material fundido del filamento sobre el tubo creando pegotes en su superficie (Figura 87).

Este suceso se produjo por la convección del aire caliente, en el cual a temperatura alta tiende a elevarse. De esta forma, de todo el aire caliente que se introducía en el horno túnel, era evacuado por 3 vías. Una gran parte de este aire caliente era evacuado por la abertura del final del túnel, por el efecto de movimiento que producía el tubo al pasar por el interior del horno; por este mismo efecto una pequeña parte era evacuada por la

abertura del inicio del horno; y por el efecto de convección del aire caliente, un parte de éste era también evacuado por la propia abertura donde estaba alojada la boquilla de la resistencia en contradirección al aire entrante, elevando de esta forma la temperatura de la propia resistencia llegando ésta a encontrarse por encima de su temperatura máxima de trabajo), y por consiguiente, por alcanzar esta elevada temperatura se llegaron a fundir los filamentos de la misma resistencia cayendo el metal fundido encima del tubo. Tras este problema la resistencia quedó inservible, teniendo que sustituirla para seguir con las pruebas.



Figura IV.90 Vías de evacuación del aire caliente dentro del horno túnel.



Figura IV.91 Pegote sobre el tubo del filamento fundido de la resistencia.

A continuación, se muestra gráficamente el resultado de las pruebas de temperatura y porcentajes de las pruebas de rotura de soldadura. Así, tras el problema anteriormente descrito de fusión del filamento de la resistencia, se establece una temperatura máxima de trabajo para evitar futuras roturas de la resistencia, puesto que el proveedor ante una nueva rotura define un período de entrega/reparación de la resistencia térmica de alrededor 10 meses dado que no son las habituales con las que la empresa suele tratar. En FLINSA, aunque se dispone de una resistencia adicional para casos de rotura y así poder seguir con las pruebas sin interrupción, para asegurar la seguridad de esta resistencia se estableció la temperatura máxima de trabajo para evitar una nueva rotura.

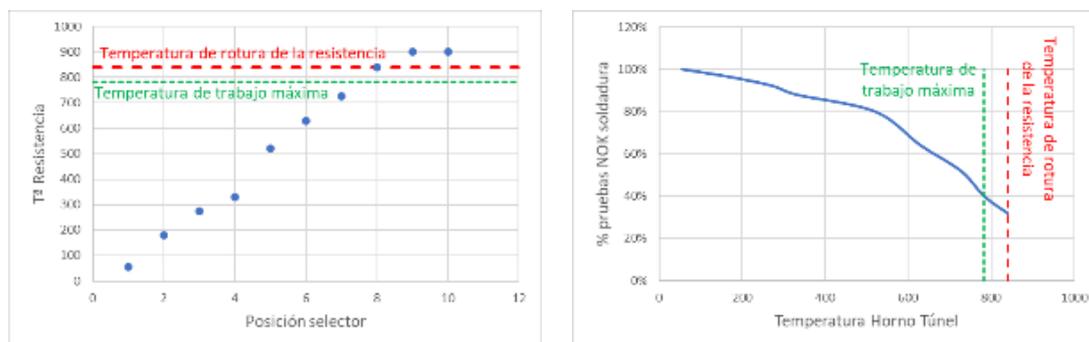


Figura IV.92 Definición de las temperaturas de rotura de la resistencia y la temperatura máxima de trabajo.

Por ello, para comprobar cuál sería el tiempo mínimo de “reposo” para que la soldadura resistiera los esfuerzos de los ensayos según norma lo más próximo al 100% de los tubos, se establecieron 2 temperaturas de trabajo para la confección de muestras, 630 y 730°C, en donde el porcentaje de soldadura OK inmediata se encontraba en torno al 50%. Se analizaron las muestras fabricadas, dejándolas reposar a diferentes tiempos en intervalos de 2 horas (por tomar como referencia tiempos de ¼ de turno). Para estas pruebas se ensayaron 10 muestras cada 2 horas durante 48 horas.

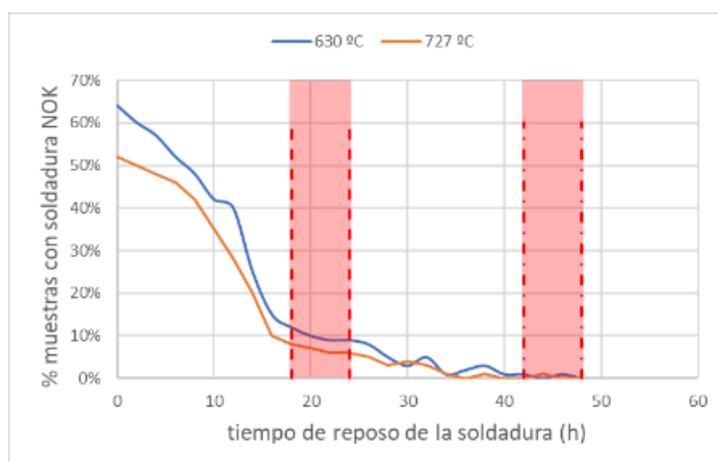


Figura IV.93 Disminución del porcentaje de muestras con soldadura NOK en función del tiempo de reposo del tubo tras su fabricación.

Durante el ensayo y análisis de estas muestras de tubo se partió del porcentaje marcado por la mejora del horno túnel, donde para una temperatura de 630°C se había reducido a un 64% de tubo NOK ensayado inmediatamente mientras que para 727°C se había conseguido reducir a un 52%. Partiendo de estos datos, se prepararon las muestras para iniciar estas pruebas donde cada 2 horas se ensayaban 10 tubos mediante abocardamiento de estos (ya que es el ensayo con mayor esfuerzo que experimenta el tubo).

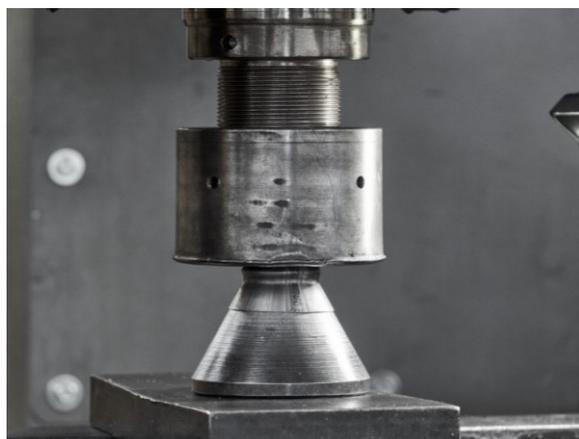


Figura IV.94 Ensayo de abocardado del tubo mediante cono a 60°.

En la Figura 89, se observan los resultados de los ensayos realizados. Se observa como en las horas de reposo, el porcentaje de tubo NOK empieza a disminuir muy levemente, pero trascurridas 10-12h de reposo el porcentaje experimenta un fuerte decrecimiento, en el transcurso de ese tiempo se han producido la mayoría de la difusión de las partículas gaseosas de la soldadura y por lo tanto esta adquiere una mayor resistencia ante los esfuerzos externos. Se observa que, para estos tiempos la temperatura de 630°C experimenta un decrecimiento en el porcentaje de tubos con soldadura NOK más acusada que en la temperatura de 727°C, además, pasadas unas pocas horas más ambas líneas empiezan a encontrarse señalizando que los efectos de difusión se han producido por completo y el tubo está OK.

Con estos datos ya se puede planificar tanto el tiempo de reposo que ha de permanecer en tubo en los almacenes de FLINSA, como el tiempo de reparto para que los efectos de difusión se produzcan durante el transporte del tubo. Cabe destacar en esta figura que, las 2 franjas rojas verticales que aparecen en el gráfico se deben a que los datos obtenidos han sido extrapolaciones de los datos circundantes, pues corresponden al tiempo que tendría un 3<sup>er</sup> turno en máquina realizando los ensayos, pero durante la realización de estos ensayos solamente se disponía de 2 turnos operativos de trabajo para esta máquina.

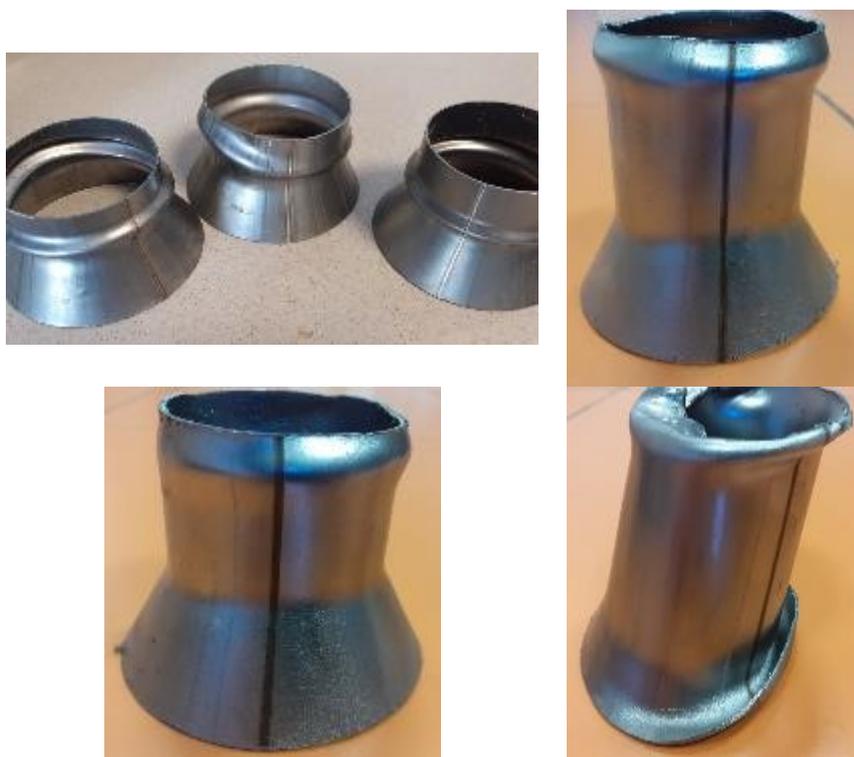


Figura IV.95 Ensayo de abocadado a tubos con diferentes diámetros.

Como conclusión de las pruebas con el Horno Túnel, con todos los resultados obtenidos, se estableció la temperatura de 630°C como temperatura estándar de trabajo para los tubos con espesores finos ( $e < 1\text{mm}$ ), para asegurar así al máximo tanto la vida útil de la resistencia como la correcta soldadura para este producto (tubos con espesor 0,8 mm).

### 1.3.2 Conclusiones parciales.

Se concluye que hay altas posibilidades de que los problemas con las roturas de soldadura tras someter la soldadura a ensayos destructivos recién fabricado el tubo provenga de disolución de hidrógeno del medio, que no se ha podido evitar.

Además, con los experimentos realizados se pueden establecer que los parámetros influyentes en este fenómeno son:

- Calidad de material a procesar.
- Espesor de material a procesar.

También se prepara un proceso de trabajo antes de poner el proceso productivo en marcha, quedando recogido en un documento oficial dentro del plan de control del proceso, siendo la instrucción de puesta en marcha.

#### 1.4 Caracterización del tubo soldado y sin soldar.

En esta etapa del proceso de análisis se han realizado los estudios sobre un acero inoxidable, concretamente en su designación bajo Norma Europea el EN 1.4512.

El acero inoxidable en cuestión es un acero inoxidable que además de cromo presenta como elemento aleante el Ti en un contenido inferior al 0.5%

La Tabla IV.19 presenta la cantidad de cada uno de los elementos presentes en el acero inoxidable EN 1.4512.

Tabla IV.19. Composiciones normalizadas de los aceros inoxidables ferríticos 1.4512.

<b>EN 1.4512</b>	
<b>C</b>	$\leq 0.030$
<b>Si</b>	$\leq 0.75$
<b>Mn</b>	$\leq 0.80$
<b>P</b>	$\leq 0.040$
<b>S</b>	$\leq 0.015$
<b>Cr</b>	10.50 – 12.25
<b>Ti</b>	$\leq 6(C+N) < 0.5$

El acero 1.4512 posee diversos elementos aleantes los cuales le proporcionan diferentes propiedades, el elemento aleante de mayor presencia es el cromo, el cual está presente en un porcentaje que oscila entre el 10.5 y el 12.25 por ciento. La presencia de este elemento es fundamental para la resistencia a la corrosión del acero. Cabe destacar la influencia del Manganeso, el cual permite la formación de ferrita a elevadas temperaturas y además inhibe la fisuración del acero 1.4512 en procesos de conformado en caliente. Otro elemento aleante que favorece la formación de ferrita es el Titanio, el cual además de ello, refina el grano y combinado con el carbono reduce la sensibilidad frente a la corrosión intergranular.

La fabricación de elementos con este tipo de acero inoxidable ferrítico requiere del uso de procesos de unión mediante soldadura, la cual genera incrementos de temperatura considerables. Posteriormente, y de forma ocasional, se producen fisuraciones o roturas cerca de la zona de unión debido a la aplicación de procesos de deformación plástica bastante acusada.

El objetivo del presente estudio es determinar las causas que provocan el fallo.

#### 1.4.1 Proceso de obtención de tubos de acero inoxidable mediante proceso de soldadura.

El proceso de obtención de tubos de acero inoxidable se inicia con el corte de la bobina suministrada con el fin de obtener flejes de distinta anchura y así poder obtener los diferentes diámetros de suministro del material.

El presente estudio se ha centrado en los tubos de diámetros 40,45, 50 (y posteriormente Ø60) con flejes de anchura de 127.5, 142.5 y 157.5 mm, todos ellos con un espesor de 0,8 mm. (Tabla IV.20).

Se han realizado análisis solamente en estos tubos ya que son los diámetros que más interesantes encontraban el mercado actual para su estudio y desarrollo.

Tabla IV.20. Relación de dimensiones iniciales de los flejes utilizados para la fabricación de tubos de 40, 45 y 50 mm de diámetro.

<b>Diámetro, mm</b>	<b>Ancho fleje, mm</b>	<b>Espesor fleje, mm</b>
<b>40</b>	127.5	0.8
<b>45</b>	142.5	0.8
<b>50</b>	157.5	0.8

Tras la obtención del fleje se procede a la fabricación del tubo mediante un primer proceso de conformado en frío y su posterior soldadura, finalmente el tubo es calibrado a fin de conseguir un elemento tubular con dimensiones y una forma circular con unas dimensiones determinadas. La Figura 92 muestra el fleje y el tubo conformado en sus diferentes fases, previa al proceso de soldadura, soldado y soldado y calibrado.



Figura IV.96 Imágenes del fleje y el tubo en distintas fases del proceso de fabricación.

Antes de analizar otros aspectos relacionados con el proceso de fabricación de tubos de acero inoxidable ferrítico se procede a estudiar y analizar el desarrollo necesario para la obtención de tubos de diámetro 40, 45 y 50 mm. La ecuación 1 muestra la ecuación necesaria para el cálculo del desarrollo necesario para la obtención de una sección circular.

$$\text{Perímetro de un círculo} = 2\pi r = D\pi$$

Haciendo uso de la ecuación correspondiente se pueden determinar los desarrollos necesarios para la fabricación de cualquier tubo. La Tabla IV.21 muestra los anchos de fleje necesarios para la fabricación de tubos de 40, 45 y 50 mm de diámetro.

Tabla IV.21. Desarrollos necesarios para la fabricación de tubos de 40, 45 y 50 mm de diámetro.

Díámetro, mm	40	45	50
Perímetro, mm	125.66	141.37	157.08

Estos valores son valores teóricos que deben ser incrementados ligeramente para corregir la pérdida de material por el proceso de fusión y unión de los bordes del fleje conformado.

Tras el corte del fleje este es conformado de forma gradual hasta conseguir una morfología cercana a la final, este proceso permite que los bordes queden prácticamente unidos a falta de unirlos mediante el proceso de soldadura.

La Tabla IV.22 muestra la distancia de separación entre los bordes que posteriormente serán unidos durante el proceso de soldadura tanto en estado natural como en estado de calibrado.

Tabla IV.22. Dimensiones iniciales del tubo previo al proceso de soldadura.

	Ø40		Ø45		Ø50	
	Sin calibrar	calibrado	Sin calibrar	calibrado	Sin calibrar	Calibrado
<b>Apertura fleje conformado, mm</b>	4.4	2.8	6.5	3.2	5	4.4
<b>Diámetro, mm</b>	41 – 41.7	40 - 41	45 – 45.3	45 – 45.1	50.5 – 51.6	50 – 50.1

#### 1.4.2 Preparación de las muestras

Dado el tamaño de los tubos es necesario la extracción de una muestra que sea representativa del proceso o fenómeno a estudiar. Para ello se procederá a la extracción de muestras de cada una de las fases de conformado/soldado/calibrado en el proceso de fabricación del tubo. En este caso, se ha procedido a la extracción de anillos de aproximadamente 20 – 25 mm para proceder posteriormente a la medición de propiedades. Este proceso ha sido llevado a cabo mediante corte refrigerado con el fin de no alterar la estructura interna del material ni sus propiedades.

La siguiente figura muestra las diferencias visuales de la apertura entre los anillos extraídos, tanto del fleje conformado (derecha) como del fleje conformado y calibrado (izquierda).

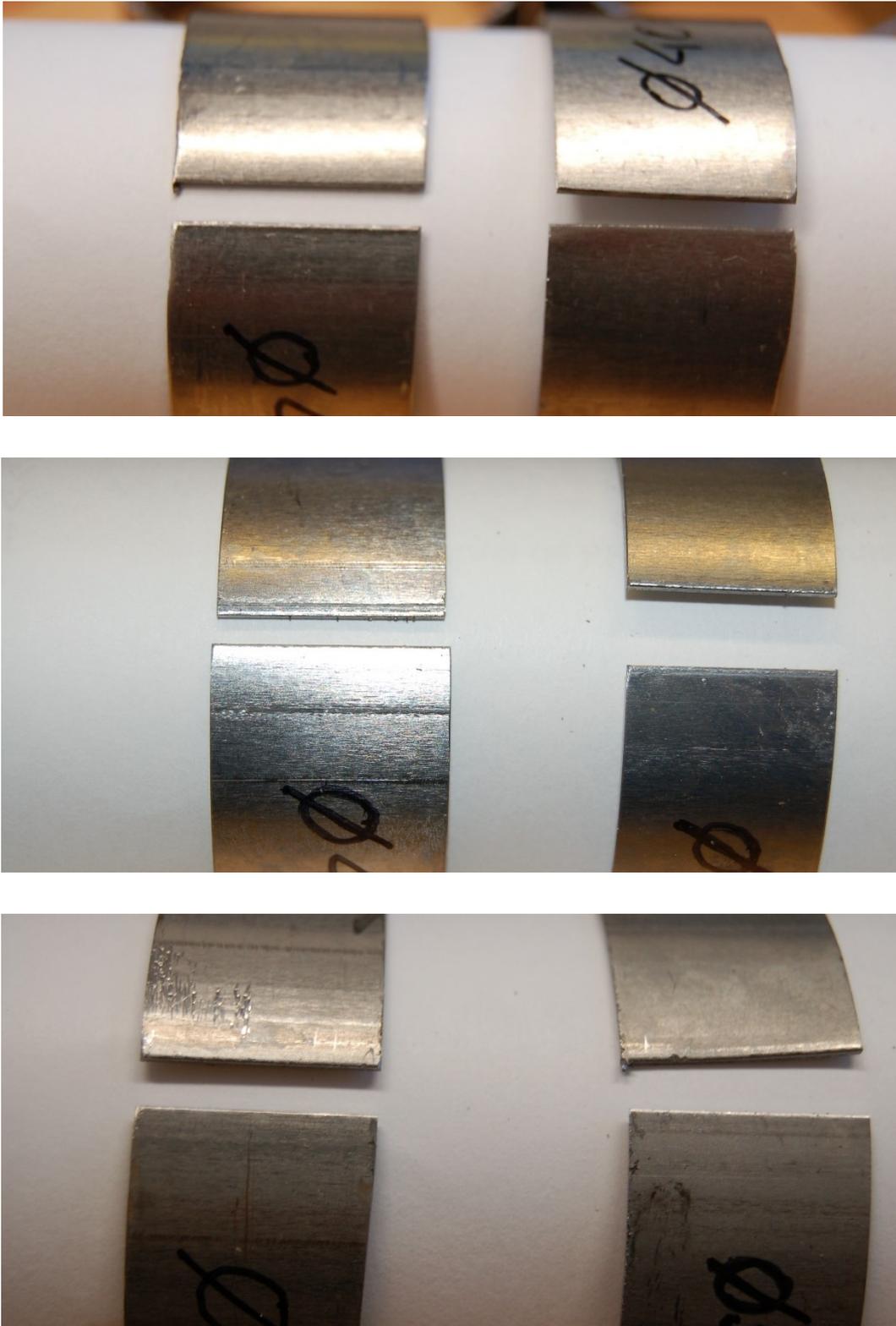


Figura IV.97 Anillos extraídos de los tubos conformados sin haber sufrido el proceso de soldadura, izquierda calibrado, derecha sin calibrar.

Tras el proceso de extracción se comprueba si ha habido diferencias en la separación entre bordes de fleje conformado respecto los que presentaba el fleje conformado (longitud aproximada de 1000 mm).

La Tabla IV.23 muestra las diferencias entre los bordes de fleje conformado y la apertura entre bordes de los anillos de estudio.

Tabla IV.23. Separación entre bordes de fleje de los diferentes diámetros, tanto del fleje conformado como de los anillos extraídos para el estudio.

	Ø40		Ø45		Ø50	
	Sin calibrar	calibrado	Sin calibrar	calibrado	Sin calibrar	Calibrado
<b>Apertura fleje conformado, mm</b>	4.4	2.8	6.5	3.2	5	4.4
<b>Apertura anillo estudio, mm</b>	2 – 2.3	2.9	6.2	2.4	3.7 – 4.7	3.3

El proceso de conformado en frío produce cierta acumulación de tensiones internas las cuales son visibles al realizar cortes transversales en los flejes conformados, aunque las variaciones no son excesivamente altas es conveniente analizar la dureza en todo el perímetro con el fin de observar diferencias consecuencia del proceso de conformado en frío que sufre el material.

Para la medición correcta la microdureza ha sido necesario la preparación de las muestras. Este proceso se inicia con la embutición en frío mediante el uso de resina de epoxi transparente utilizando como molde anillos de policloruro de vinilo. Dado que la técnica de microdureza requiere de muestras con caras de elevado paralelismo, las muestras han sido desbastadas y posteriormente pulidas; además este acabado superficial es requerido para la correcta medición de la huella generada por la punta de diamante utilizada.

La Figura 98, muestra diversas muestras utilizadas durante el estudio, en las que se puede observar las marcas de referencia utilizadas para la adquisición y toma de valores de microdureza.

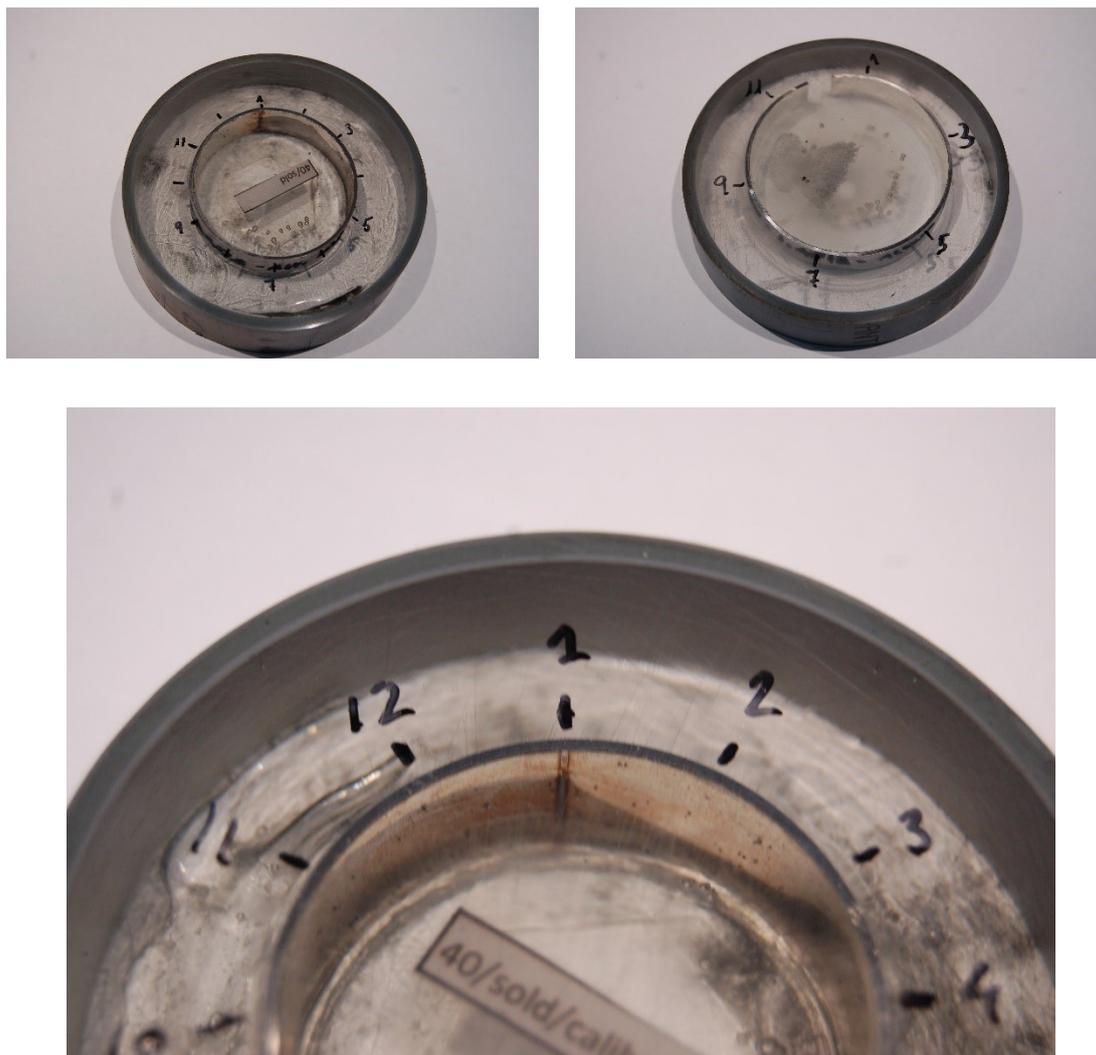


Figura IV.98 Embutición de los anillos con las marcas para la medición de microdureza.

### 1.4.3 Obtención de los Valores de Microdureza.

La microdureza ha sido obtenida haciendo uso de la escala Vickers, la cual utiliza un penetrador de punta de diamante con forma de pirámide invertida con un ángulo entre caras de 136°. El cálculo de la microdureza Vickers se realiza mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$H_{mV} = \frac{P}{S} (\text{Kg/mm}^2) = 1854,36 \frac{P(g)}{d^2(\mu^2)}$$

Con el fin de realizar una comparativa se ha procedido a tomar valores de microdureza a lo largo de todo el perímetro, tomando valores cada 10 - 12 mm.

Las condiciones para la realización de las mediciones de la microdureza han sido las siguientes:

- Peso utilizado 500 gramos.
- Tiempo de permanencia de la carga 15 segundos.

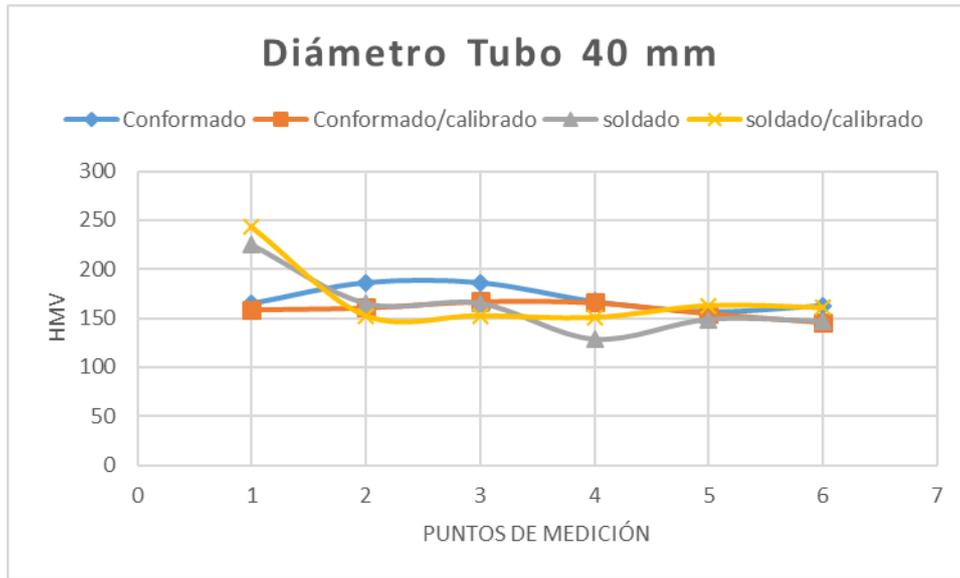


Figura IV.99 Valores de microdureza de diversos puntos del perímetro en diferentes estados del proceso de fabricación del tubo de 40 mm.

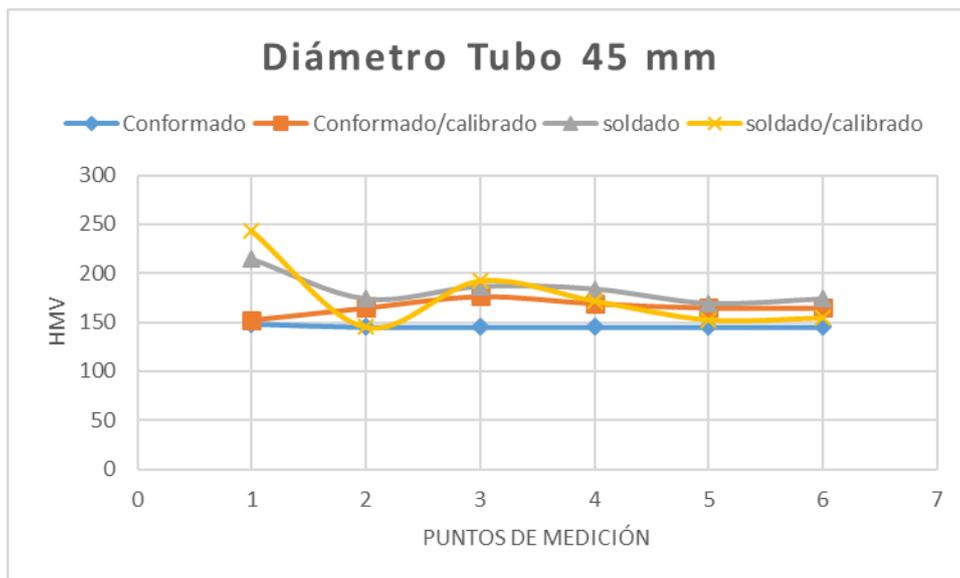


Figura IV.100 Valores de microdureza de diversos puntos del perímetro en diferentes estados del proceso de fabricación del tubo de 45 mm.

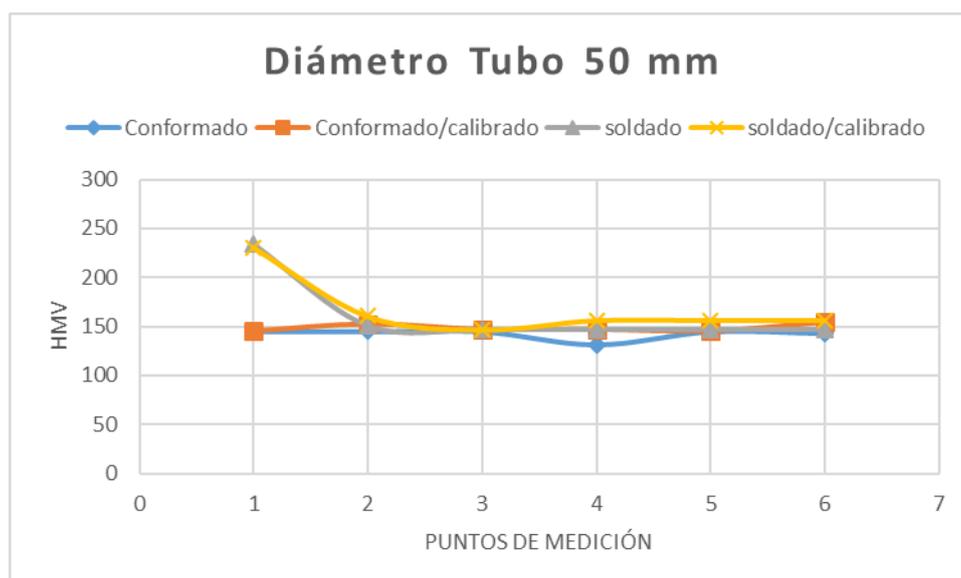


Figura IV.101 Valores de microdureza de diversos puntos del perímetro en diferentes estados del proceso de fabricación del tubo de 50 mm.

Los resultados obtenidos tras la aplicación de la técnica de microdureza permite observar un incremento de los valores de dureza situados en el punto de soldadura de todas las muestras analizadas, situando dicho valor en valores entre 214 y 233 HmV. Este hecho permite concluir que el proceso de deformación en frío aplicado para la conformación de los tubos de acero inoxidable ferrítico 1.4512 no es causante de acritud en los tubos conformados.

Dados estos resultados es necesario ampliar el estudio analizando con más detalle la zona donde se producen cambios en la dureza del material (zona de soldadura)

#### 1.4.4 Estudio de la dimensión de la zona afectada

Para el presenta apartado se han preparado muestras representativas de la zona de estudio, en este caso, se ha requerido de la extracción de la zona de soldadura mediante corte refrigerado para posteriormente proceder a la embutición en frío de las muestras.

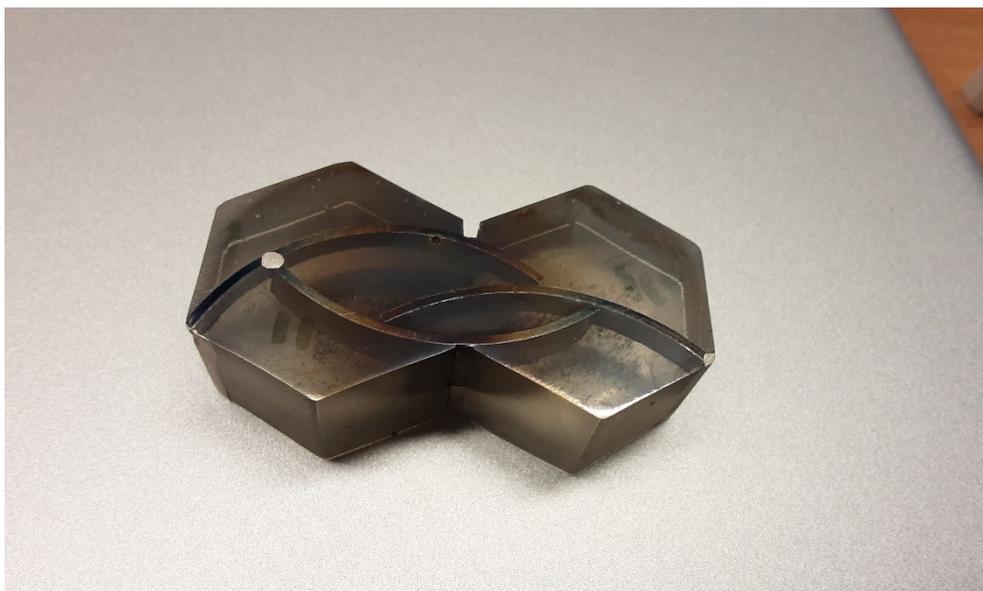


Figura IV.102 Muestra embutidas para su observación mediante la técnica de FESEM.

Finalizada la etapa de embutición se procede al desbaste refrigerado de la superficie con un gramaje de P240 para finalizar con un papel de gramaje P1200. EL proceso se finaliza con el pulido de las superficies con un paño de pelo corto haciendo uso de pasta de diamante con un tamaño de partícula de 1 micra.

Tras el pulido se ha procedido a la aplicación de la disolución ácida (Vilella) con el fin de revelar la microestructura correspondiente a cada una de las muestras, y localizar fácilmente la zona de soldadura.

La microestructura, entendiéndola como tal la distribución, tamaño y morfología de los granos (zonas ordenadas estructuralmente), es un factor relevante en el comportamiento de un material metálico. Ésta puede verse alterada por diversos fenómenos tales como la deformación en frío o la aplicación de temperaturas extremas. Con estos condicionantes es de vital importancia analizar las muestras en la zona donde se ha producido la soldadura para la conformación del tubo de acero inoxidable ferrítico.

Para llevar a cabo esta labor, se ha procedido al uso de la microscopía óptica y el uso de un patrón de medición con el fin de determinar las variaciones producidas en esta zona.

Previa a la observación de la zona afectada se ha procedido a la preparación metalográfica de la zona soldada con el fin de observar la microestructura en esta zona.

Tal cual se muestra en la figura 99, se puede observar la zona afectada térmicamente por el proceso de unión de los dos bordes para el conformado del tubo de 40 mm. La imagen muestra diferencias en cuanto a la zona afectada entre la cara exterior e interior de la soldadura. En este caso, la zona exterior alcanza una zona afectada térmicamente de 1mm, mientras que la zona interna de la soldadura sólo es afectada térmicamente 0.4 mm.

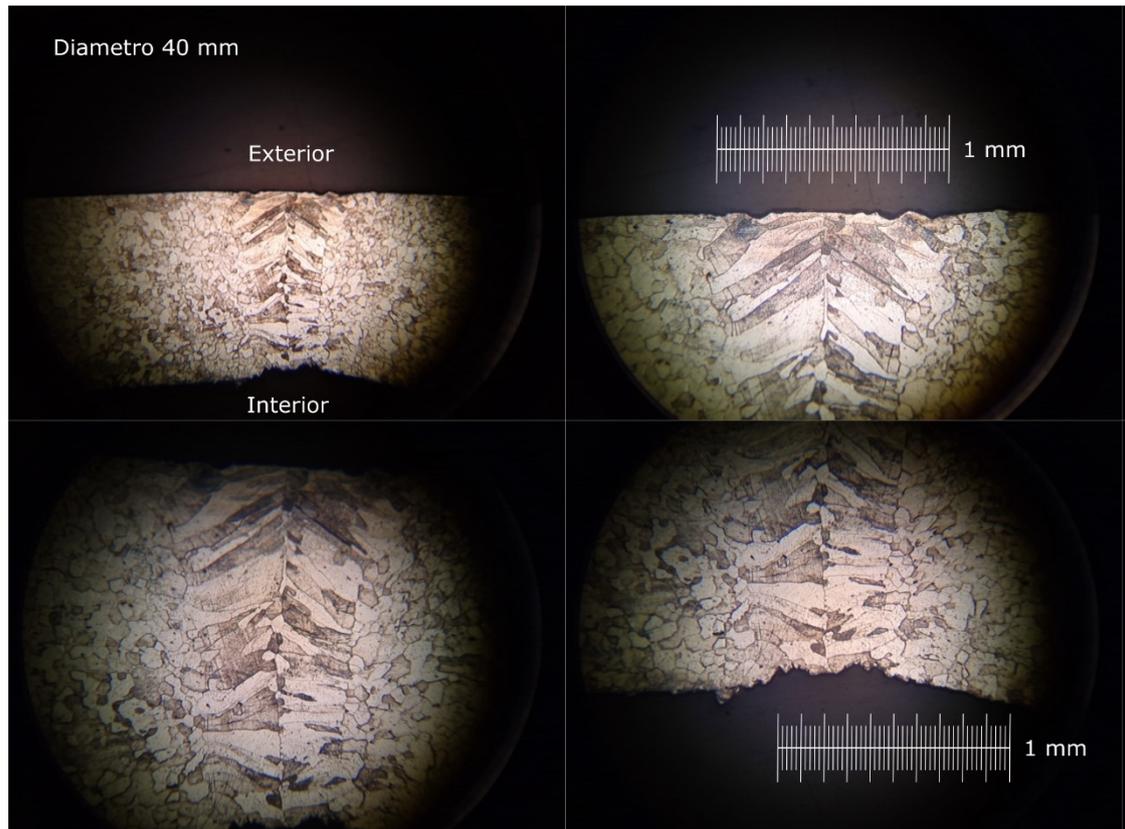


Figura IV.103 Micrografía de la zona afectada térmicamente en un tubo de diámetro 40 mm.

Al igual que en el caso anterior, la muestra analizada correspondiente al tubo de diámetro 45 mm presenta también diferencias entre la zona exterior y la zona interior del tubo; en este caso, la parte externa muestra una zona afectada por el proceso de soldadura de 1 mm, mientras que la zona interna el valor es inferior, 0.6 mm (Figura 100).

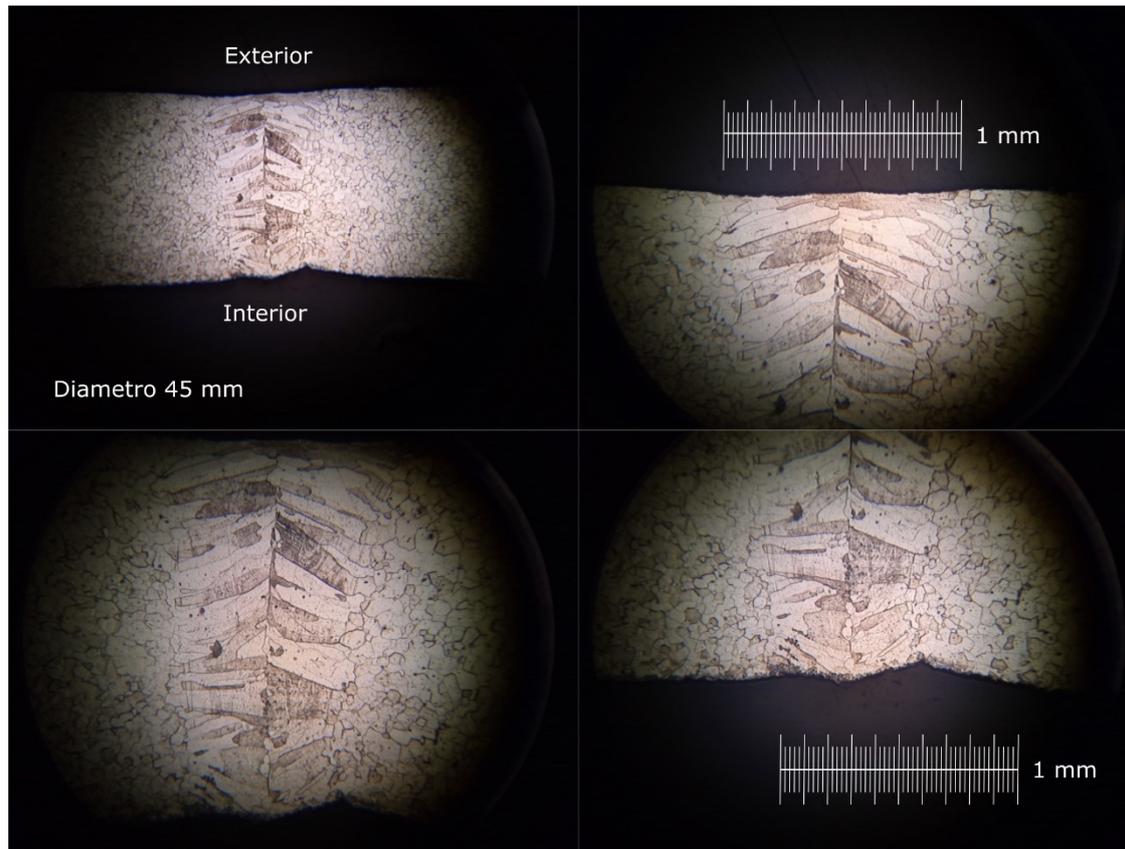


Figura IV.104 Micrografía de la zona afectada térmicamente en un tubo de diámetro 45 mm.

Por último, y siguiendo la misma tendencia, el tubo con un diámetro de 50 mm presenta una zona afectada térmicamente de 1 mm en la zona exterior y de 0.5 mm en la parte interior.

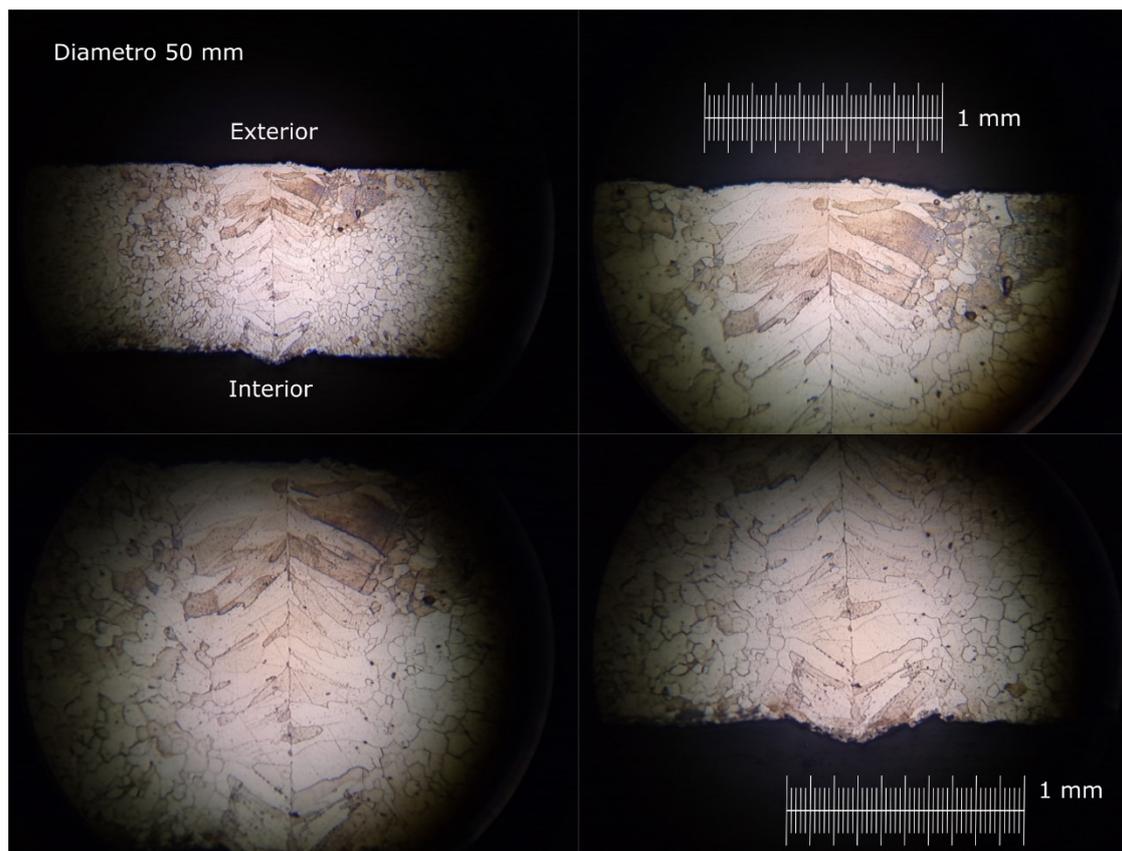


Figura IV.105 Micrografía de la zona afectada térmicamente en un tubo de diámetro 50 mm.

Tras analizar las diferentes zonas afectadas por efecto del proceso térmico de unión, la zona afectada externa es igual en todos los diámetros analizados, en cambio, si se pueden observar diferencias, aunque pocas, en la zona interior del tubo.

La Tabla IV.24 muestra la relación de valores obtenido con el análisis de los diferentes diámetros analizados.

Tabla IV.24. Dimensión de la zona afectada térmicamente en función del diámetro de tubo utilizado.

Diámetro, mm	Zona exterior, mm	Zona interior, mm
40	1	0.4
45	1	0.6
50	1	0.5

#### 1.4.5 Análisis de la composición

Para llevar a cabo esta fase en el proyecto se ha realizado una extracción de muestras de tubos de distinto diámetro (40, 45 y 50 mm) de una zona que contenga el cordón de soldadura.

Finalizada la etapa de embutición se procede al desbaste refrigerado de la superficie con un gramaje de P240 para finalizar con un papel de gramaje P1200. Finalizada la etapa de desbaste, las muestras han sido pulidas con un paño de pelo corto haciendo uso de pasta de diamante con un tamaño de partícula de 1 micra.

Tras el pulido se ha procedido a la aplicación de la disolución ácida (Vilella) con el fin de revelar la microestructura correspondiente a cada una de las muestras, y localizar fácilmente la zona de soldadura.

Para el análisis de composición se ha utilizado la microscopía electrónica de Barrido de emisión de campo con detector de energía dispersiva de rayos X (FESEM). La técnica permite obtener una detallada información de la superficie de la muestra. El haz de electrones barre la superficie de la muestra a la vez que el monitor muestra la información que se haya seleccionado en función del detector elegido.

En este caso, el detector de energía dispersiva de Rayos X, EDS, permite conocer información analítica cualitativa y cuantitativa de la superficie.

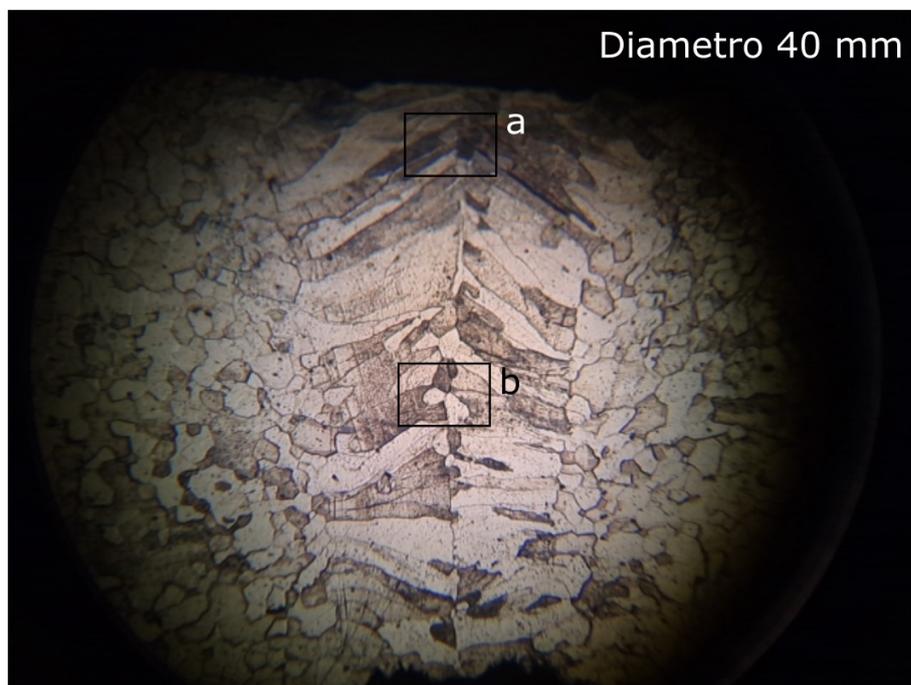
El estudio de las muestras aportadas se ha centrado en dos zonas, en primer lugar, en la zona afectada térmicamente por el fenómeno de unión para la conformación del tubo y en segundo lugar, en la zona no afectada térmicamente, la cual será denominada zona de material base. Además, se han realizado análisis composicionales a diversos aumentos (x1000 y x3000) con el fin de aumentar la precisión composicional de las muestras analizadas.

Este procedimiento ha sido aplicado para todos los diámetros suministrados tanto para 40, 45 y 50 mm.

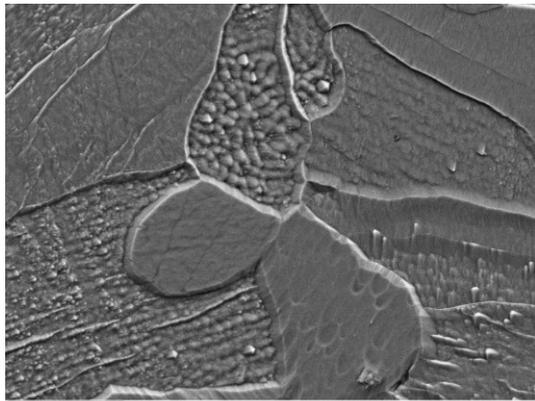
#### 1.4.5.1 Estudio sobre el tubo con diámetro 40 mm

##### 1.4.5.1.1 *Zona de la soldadura del tubo 40 mm*

El análisis en esta zona ha sido llevado a cabo en dos ubicaciones, una cerca de la cara externa del tubo y otra en el centro de la soldadura.



b



a

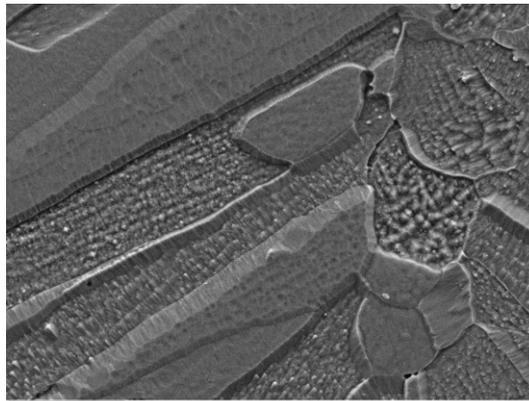


Figura IV.106 Imágenes obtenidas a mil aumentos de las zonas de estudio (cerca de la superficie exterior del tubo y en el centro de la soldadura)

En ambos casos, el estudio de la composición no revela cambios significativos entre las distintas zonas, la

Tabla IV.25 muestra los valores medios de los compuestos detectados en la muestra, así como de la dispersión de dichos valores. En ambos análisis no se observan desviaciones elevadas, ni fuera de la norma.

Tabla IV.25. Composición de la zona de soldadura correspondiente al tubo de diámetro 40mm

Elemento	Composición de a	Composición de b	Promedio de composición	Desviación de composición
<b>Mn</b>	0,32	0,37	0,35	0,04
<b>Cr</b>	11,79	11,74	11,77	0,04
<b>Ti</b>	0,14	0,16	0,15	0,01
<b>S</b>	0,07	0,05	0,06	0,01
<b>P</b>	0,04	0,05	0,05	0,01
<b>Si</b>	0,44	0,43	0,44	0,01

#### 1.4.5.1.2 Zona no afectada térmicamente del tubo de 40 mm.

El mismo estudio y análisis ha sido llevado a cabo en una zona alejada de la soldadura con el fin de eliminar cualquier efecto que hubiese podido causar la temperatura del proceso de unión.

Del mismo modo se ha procedido a analizar la zona alejada de la soldadura, denominada material base. A nivel visual es destacable la presencia de cierto número de precipitados que posteriormente con el análisis composicional pueden definirse cómo precipitados de titanio.

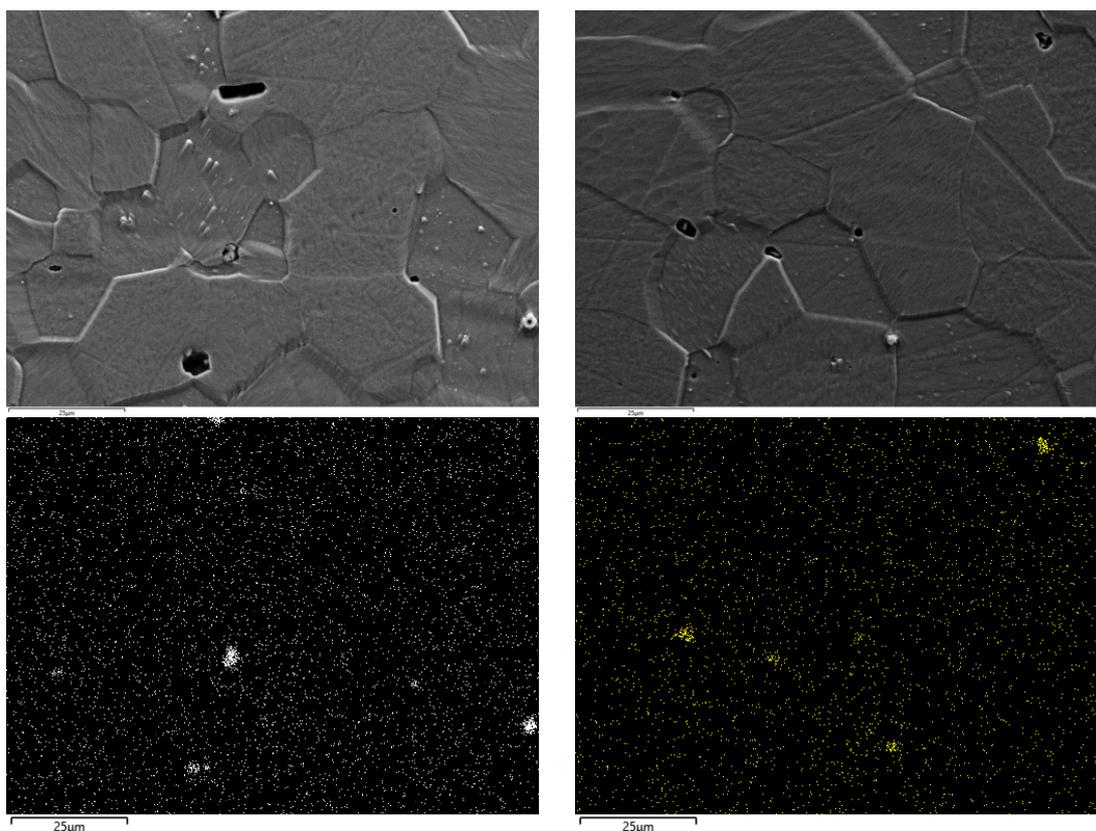


Figura IV.107 Imágenes obtenidas a mil aumentos del material base correspondiente al tubo de diámetro 40 mm (Zona de material base 1 (der) y zona de material base 2 (izq))

La composición de ambas zonas muestra valores de composición muy semejante entre sí.

Tabla IV.26. Composición del material base correspondiente al tubo de diámetro 40mm

Elemento	Zona material base1	Zona material base2	Promedio de composición	Desviación de composición
Mn	0,3	0,39	0,35	0,06
Cr	11,83	11,81	11,82	0,01
Ti	0,3	0,22	0,26	0,06
S	0	0	0,00	0,00
P	0,05	0,04	0,05	0,01
Si	0,42	0,41	0,42	0,01

Una de las diferencias que se pueden observar a nivel de composición en el tubo de 40 mm de diámetro, es un mayor porcentaje de titanio en la muestra; este hecho es debido a la presencia de un mayor número de precipitados de titanio en la zona correspondiente al material base (no afectado térmicamente).

#### 1.4.5.2 Estudio sobre el tubo de diámetro 45

##### 1.4.5.2.1 *Zona de la Soldadura del tubo 45 mm.*

Del mismo modo, se han analizado diversas zonas en el tubo de 45 mm de diámetro. Los resultados, en cuanto a composición se refiere, son muy semejantes a los observados con la muestra perteneciente al tubo de diámetro 40mm. La presencia de titanio es mayor en el material base que en la zona de soldadura, es frecuente encontrar precipitados de titanio en el material base siendo menos frecuente su presencia en la zona soldada.

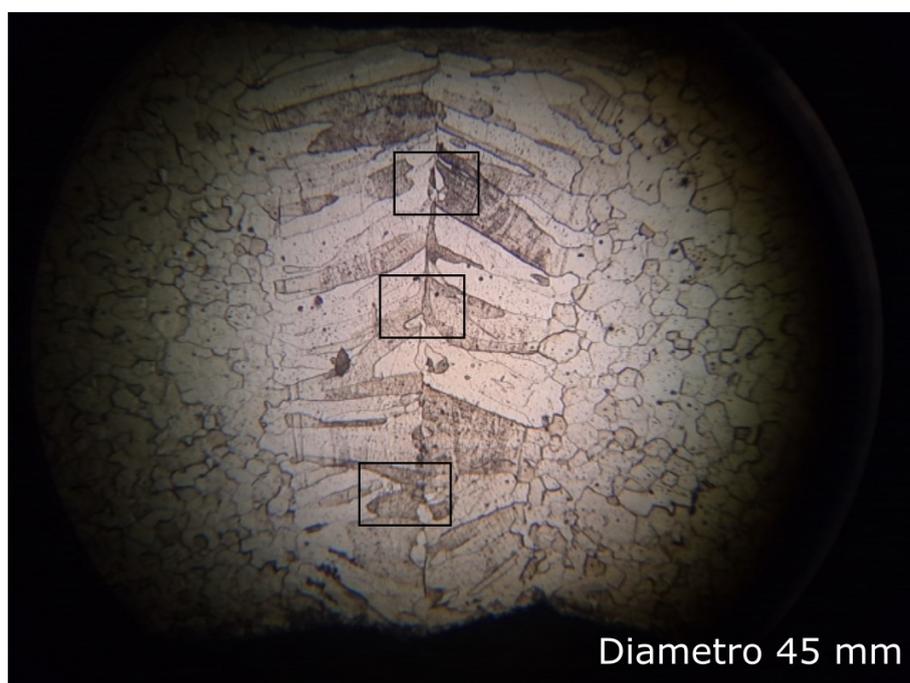


Figura IV.108 Micrografía a 1000 aumentos de la zona afectada térmicamente del tubo de 45 mm con las diversas zonas de análisis.

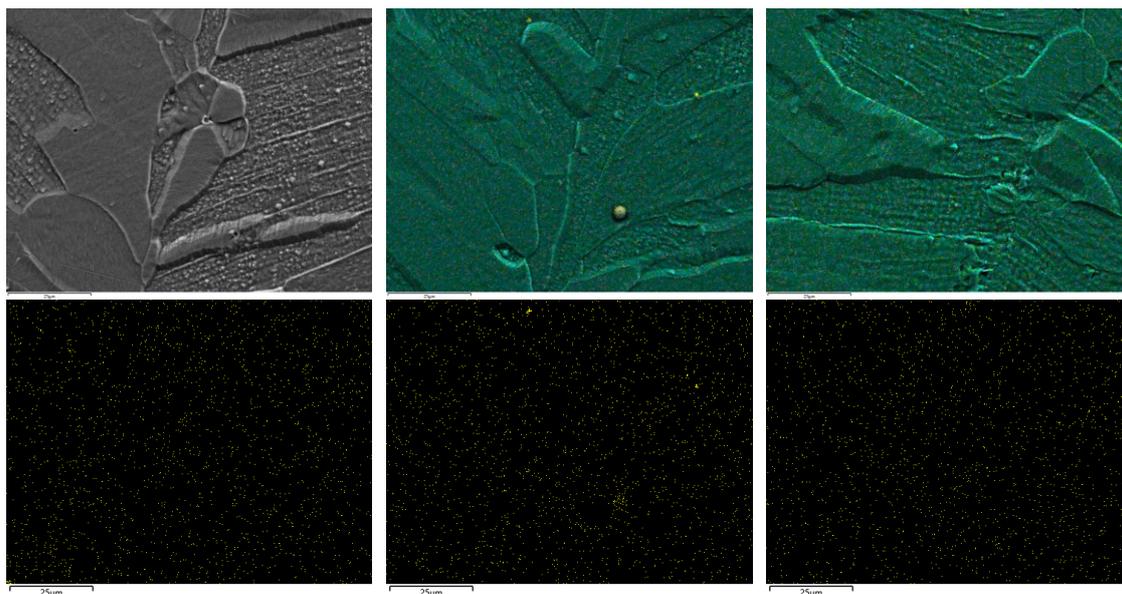


Figura IV.109 Micrograffas y mapa de la distribución de titanio en la imagen analizada.

#### 1.4.5.2.2 Zona no afectada del tubo 45 mm.

Al igual que en el caso anterior se ha analizado la composición del material base correspondiente al tubo de diámetro 45 mm.

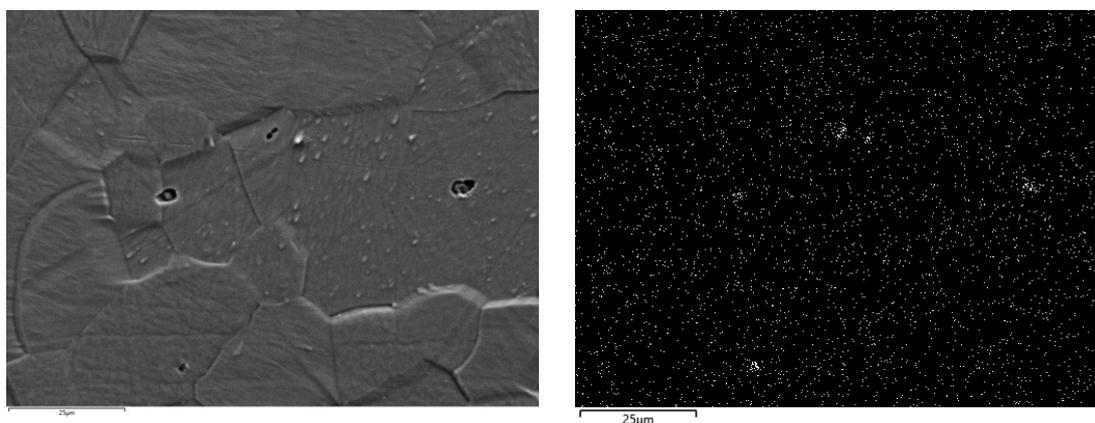


Figura IV.110 Imagen de una zona no afectada por la soldadura e identificación de precipitados de titanio en la zona no afectada térmicamente en el tubo de 45 mm

El análisis composicional permite observar de nuevo una mayor presencia de titanio en el material base por la presencia de precipitados de este elemento.

Tabla IV.27. Composición del material base y la zona de soldadura correspondiente al tubo de diámetro 45 mm.

Elemento	Soldadura		Material Base	
	%peso	desv	%peso	desv
<b>Mn</b>	0,24	0,12	0,34	0,09
<b>Cr</b>	11,80	0,14	11,89	0,11
<b>Ti</b>	0,20	0,05	0,24	0,05
<b>S</b>	0,03	0,04	0,00	0,04
<b>P</b>	0,03	0,03	0,05	0,04
<b>Si</b>	0,40	0,03	0,41	0,05

#### 1.4.5.3 Estudio sobre el tubo de diámetro 50

Con el fin de completar el estudio, se han analizado tubos de mayor diámetro. Los resultados se repiten con ligeras variaciones de composición de Titanio.

##### 1.4.5.3.1 Zona de la soldadura del tubo 50 mm.

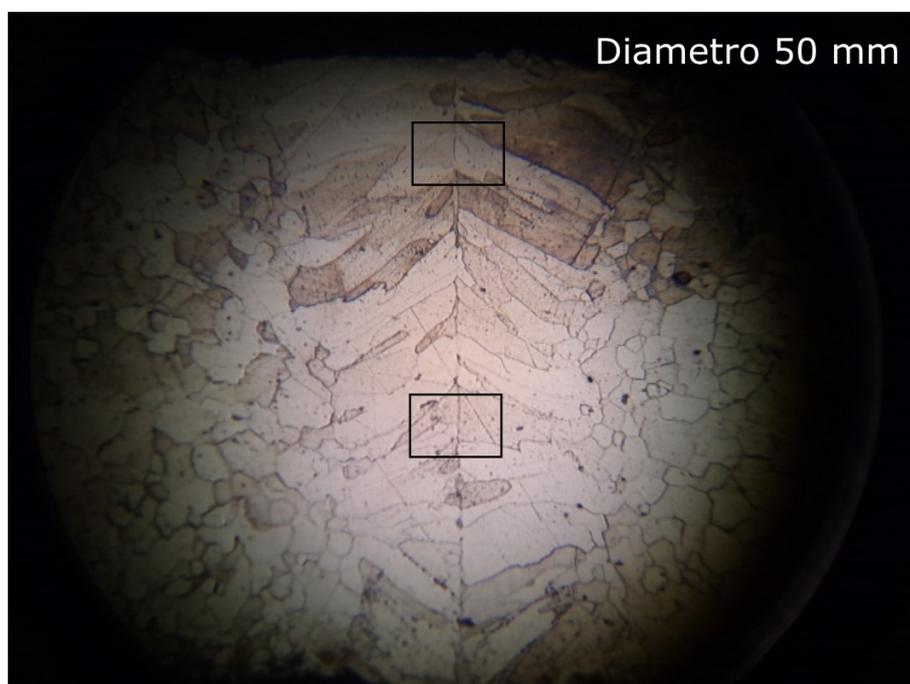


Figura IV.111 Microestructura de la zona afectada térmicamente por el proceso de unión en el tubo de 50 mm.

Al igual que en el resto de muestras y siguiendo el mismo patrón de estudio se han analizado zonas dentro de la soldadura. De nuevo, distribución de titanio se produce de forma homogénea por la zona analizada.

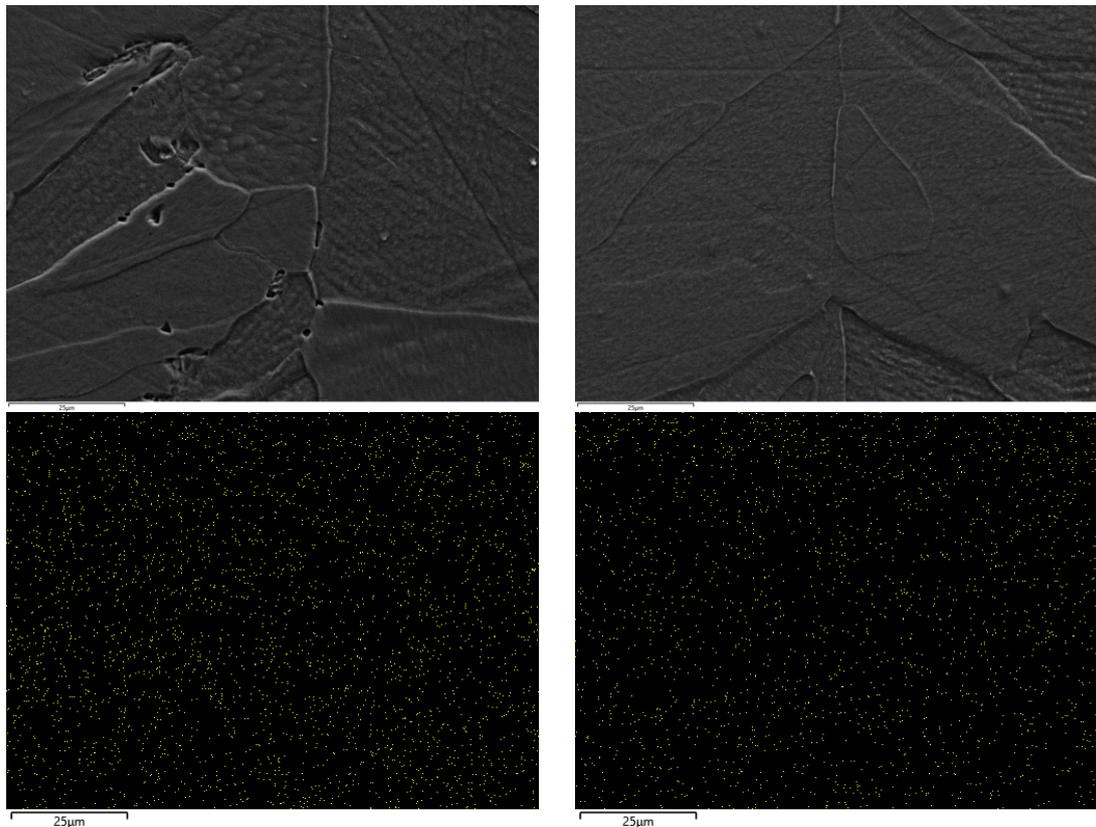


Figura IV.112 Micrografías SEM de la zona afectada térmicamente por el proceso de soldadura (x1000)

#### 1.4.5.3.2 Zona no afectada del tubo 50 mm.

En cuanto a la zona de material base, la presencia de precipitados se repite y su mayor o menor presencia depende de la zona elegida, pudiéndose apreciar en ocasiones zonas donde no existen precipitados y zonas donde su presencia es mayor, aunque no se ha observado un patrón que permita obtener conclusiones de esta distribución en la zona no afectada térmicamente.

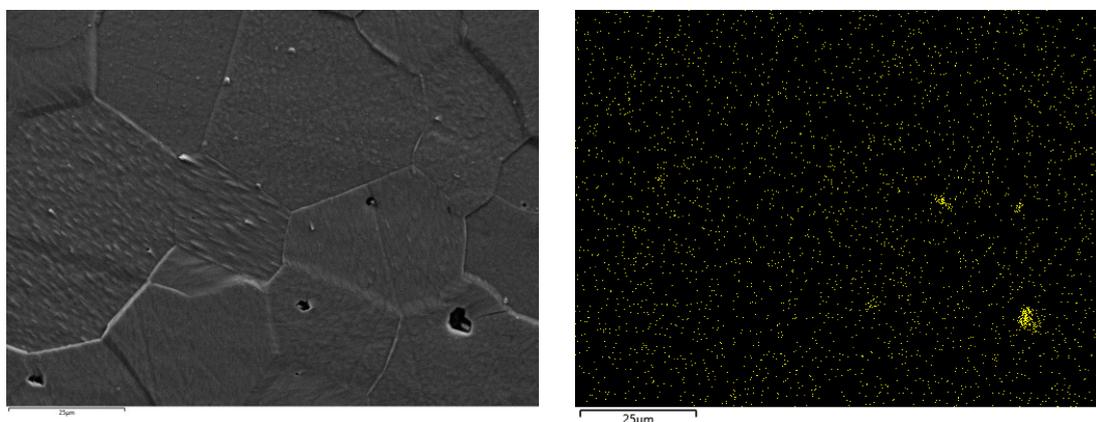


Figura IV.113 Imagen de una zona no afectada por la soldadura e identificación de precipitados de titanio en la zona no afectada térmicamente en el tubo de 50 mm.

El análisis composicional de las diferentes zonas analizadas permite de nuevo observar un mayor porcentaje de titanio en la zona de material base.

Tabla IV.28. Composición del material base y la zona de soldadura correspondiente al tubo de diámetro 50 mm.

Elemento	Soldadura	Base
	%peso	%peso
Mn	0,45 ± 0,04	0,36 ± 0,09
Cr	11,79 ± 0,06	11,85 ± 0,11
Ti	0,13 ± 0,01	0,20 ± 0,04
S	---	0,05 ± 0,04
P	0,05 ± 0,01	0,06 ± 0,04
Si	0,43 ± 0,01	0,40 ± 0,05

#### 1.4.5.4 Análisis a 3000 aumentos.

Dados los resultados anteriores se ha decidido realizar un estudio a mayores aumentos con el fin de aumentar la precisión en la adquisición de datos. La

Tabla IV.29 revela la composición de diversas zonas a 3000 aumentos.

Tabla IV.29. Valores de composición obtenidos a 3000 aumentos de diversas zonas en los diámetros 40, 45 y 50 mm.

<b>Soldadura</b>			
	<b>Tubo 40</b>	<b>Tubo 45</b>	<b>Tubo 50</b>
Elemento	%peso	%peso	%peso
<b>Mn</b>	0,35 ± 0,06	0,34 ± 0,03	0,39 ± 0,13
<b>Cr</b>	11,89 ± 0,13	11,75 ± 0,02	11,77 ± 0,04
<b>Ti</b>	0,24 ± 0,11	0,31 ± 0,13	0,26 ± 0,20
<b>S</b>	0,05 ± 0,03	0,05 ± 0,00	0,02 ± 0,02
<b>P</b>	0,04 ± 0,04	0,06 ± 0,04	---
<b>Si</b>	0,46 ± 0,08	0,45 ± 0,01	0,45 ± 0,05
 <b>Base</b> 			
	<b>Tubo 40</b>	<b>Tubo 45</b>	<b>Tubo 50</b>
Elemento	%peso	%peso	%peso
<b>Mn</b>	0,34 ± 0,09	0,40 ± 0,12	0,35 ± 0,08
<b>Cr</b>	11,85 ± 0,08	11,83 ± 0,12	11,73 ± 0,37
<b>Ti</b>	0,31 ± 0,22	0,38 ± 0,27	0,28 ± 0,18
<b>S</b>	0,06 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,02 ± 0,03
<b>P</b>	0,07 ± 0,02	0,07 ± 0,05	0,02 ± 0,01
<b>Si</b>	0,41 ± 0,07	0,42 ± 0,06	0,46 ± 0,04

El análisis de los resultados de las muestras analizadas a 3000 aumentos no muestra diferencias significativas, se repite una mayor dispersión de valores en las composiciones de titanio por la presencia o no de precipitados de este elemento.

#### 1.4.6 Efecto de la aplicación de temperatura tras el proceso de soldadura sobre tubo de diámetro 60 mm.

La medición de la microdureza a lo largo de todo el perímetro del tubo refleja que independientemente de la zona analizada los valores de dureza permanecen en valores muy cercanos entre sí.

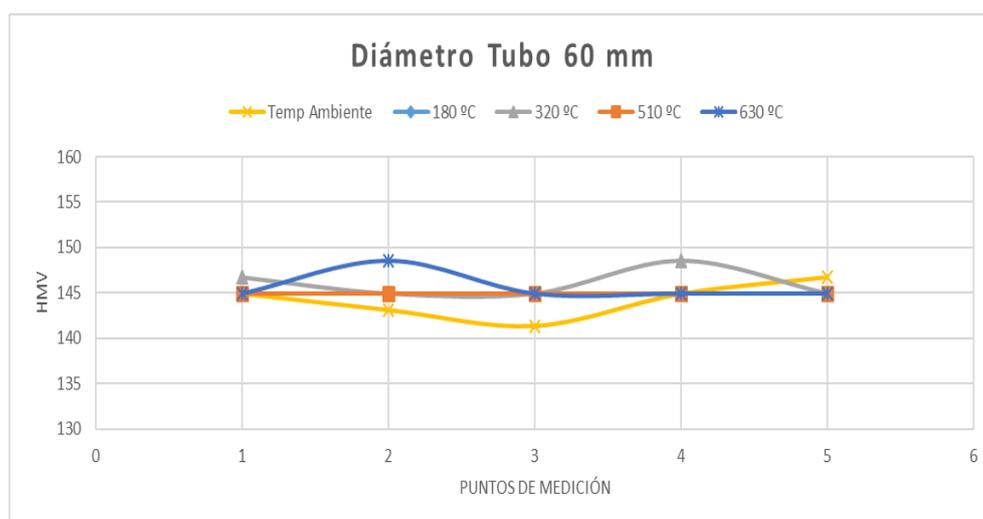


Figura IV.114 Representación de los valores de microdureza obtenidos a lo largo de todo el perímetro del tubo equidistantes entre sí.

Los resultados en la zona de soldadura son diferentes. Con el fin de analizar con detalle dicha zona, se ha procedido a realizar mediciones en toda la zona afectada térmicamente por el proceso de unión del fleje para la conformación del tubo de diámetro 60 mm. En la Figura 115; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar las huellas generadas para la obtención de los valores microdureza en la zona afectada térmicamente por el proceso de unión, en el tubo en condiciones de temperatura ambiente, así como en el resto de tubos tratados posteriormente a diversas temperaturas.

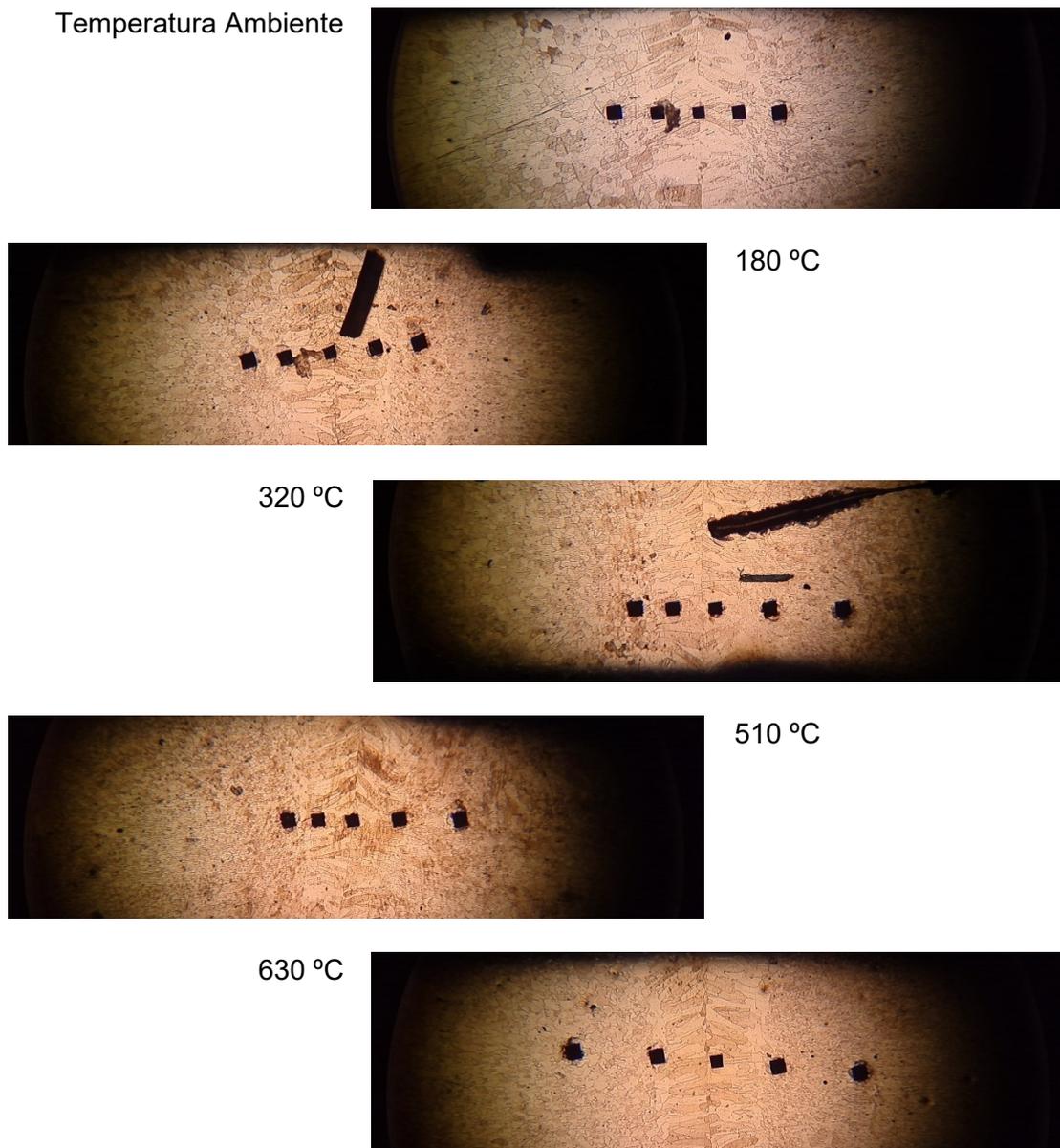


Figura IV.115 Imágenes de las diferentes huellas generadas por la punta piramidal de diamante para la obtención de la microdureza.

La medición en la zona de soldadura tomando varios puntos de referencia tanto en la zona de unión como justo en la zona contigua a la zona afectada térmicamente, no muestra diferencias entre el tubo sin tratar y el resto de muestras tratadas a diferentes temperaturas (180, 320, 510 y 630 °C). En todas ellas puede observarse cómo justo en el centro de la zona afectada térmicamente se alcanzan los máximos valores de microdureza, todas ellas en torno a un valor de 250 mHV, siendo un 78% superior al valor que aparece en el material base.

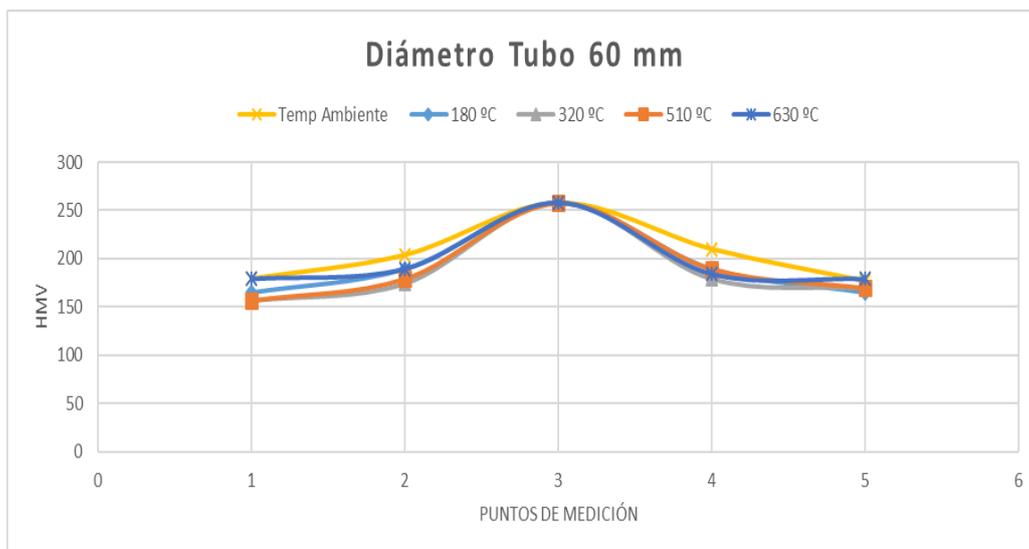


Figura IV.116 Valores de microdureza obtenidos en la zona afectada térmicamente del tubo de diámetro 60mm tratado térmicamente a diferentes temperaturas.

La acumulación de tensiones internas en procesos de conformado en frío de metales es frecuente, estas quedan retenidas en el material y pueden ser la causa de la rotura de metales en un nivel más bajo de tensión. En el caso de secciones tubulares, bien sea circulares o de otra sección cerrada, el corte de dicha morfología puede revelar la existencia de dichas tensiones por la apertura producida en la sección tras el proceso de corte.

Con el fin de evitar la pérdida de material el sistema de corte elegido ha sido el corte por cizalladura, con el que ambos extremos coinciden a la perfección. Tal cual se observa en la Figura 113, y los valores obtenidos en la medición de dicha apertura (Tabla IV.30), las diversas muestras no presentan diferencias significativas entre ellas.



Figura IV.117 Apertura del tubo de diámetro de 60 mm tras el corte por cizalla. De izquierda a derecha; tubo a temperatura ambiente, tratado a 180°C, 320°C, 510 °C y 630°C.

Tabla IV.30. Valores de la apertura del tubo de diámetro 60 mm tras el corte por cizalla en función de la temperatura de tratamiento.

<b>Tubo de diámetro 60 mm</b>					
<b>Apertura</b>	<b>Temperatura de tratamiento tras el proceso de soldadura</b>				
	<b>25</b>	<b>180</b>	<b>320</b>	<b>510</b>	<b>630</b>
Máxima, mm	3.3	2.9	2.7	2.8	2.8
Mínima, mm	2.5	2.2	2.0	1.9	1.9

Por otro lado, se ha analizado la influencia del tratamiento térmico del tubo tras el proceso de soldadura sobre la resistencia de la zona de unión, para ello se ha procedido al desdoblado de los anillos anteriormente mencionados para su caracterización mecánica. Con el fin de obtener valores representativos se han ensayado cinco muestras de cada una de las temperaturas del tratamiento.

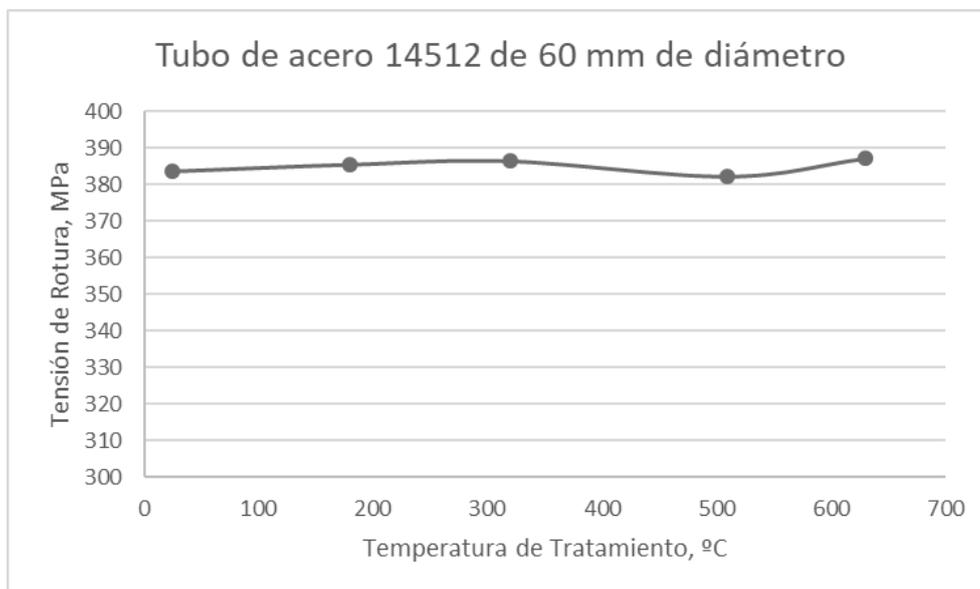


Figura IV.118 Evolución de la Tensión Máxima a tracción de los tubos tratados térmicamente (media de cinco muestras).

Los valores obtenidos tras la caracterización mecánica de las diversas muestras no indican diferencias significativas ni ninguna tendencia relacionada con la temperatura del proceso térmico tras el proceso de soldadura (Figura 115).

Finalmente, y tras la caracterización de todo el conjunto de muestras, cabe mencionar que todas las roturas se han producido en zonas alejadas de la zona afectada

térmicamente por la soldadura. Indicativo que la zona de unión presenta mayor resistencia que el material base.

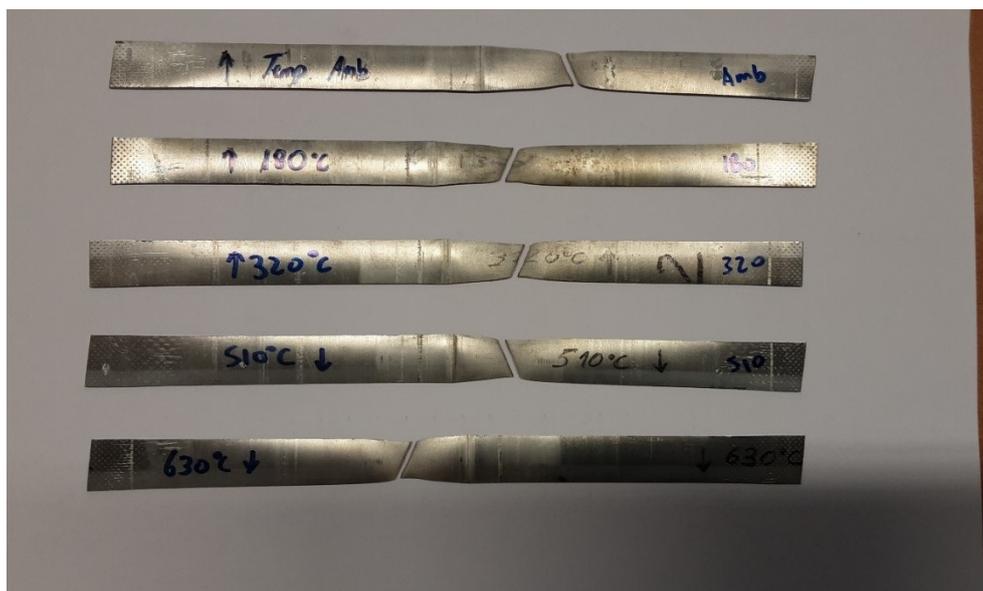


Figura IV.119 Probetas tratadas térmicamente utilizadas para la obtención de la resistencia máxima a tracción.

#### 1.4.7 Conclusiones parciales.

Tras la realización del estudio y analizados los resultados, se puede concluir lo siguiente:

El ancho del fleje utilizado se ajusta en gran medida a los valores teóricos; cabe mencionar la dimensión del fleje utilizado para la fabricación del tubo de diámetro 40 y 45 mm, ya que presenta una diferencia respecto el valor teórico de 1.9 y 1.3 mm respectivamente.

El proceso de obtención de muestras para su posterior estudio y análisis han permitido observar la presencia de tensiones internas al producirse variaciones en la apertura de los tubos previo al proceso de soldadura.

La técnica de microdureza ha permitido detectar un aumento de los valores de dureza próximo al 60% en todas las muestras analizadas.

En cuanto a la zona afectada térmicamente por el proceso de unión, ésta es muy semejante entre todos los diámetros (1 mm en la zona exterior del tubo y aproximadamente 0.5 mm en la zona interna del tubo).

Finalmente, el análisis composicional de las muestras, tanto en la zona de soldadura como en la zona no afectada térmicamente revela una composición muy similar entre todas ellas. las únicas diferencias se encuentran en el porcentaje de titanio presente, el cual, queda definido en gran parte por la presencia de precipitados. Estos precipitados han sido observados con mayor frecuencia en la zona no afectada térmicamente.

La aplicación de tratamientos térmicos en el tubo de diámetro 60mm no provocan cambios relevantes en la microestructura del material y consecuentemente en los valores de microdureza de estos. Por otro lado, los análisis de las tensiones internas

indican la ausencia de estas durante el proceso de conformado del tubo de diámetro 60 mm y un espesor de 0,8 mm.

A nivel macroscópico, los valores de tensión de rotura obtenidos en función de la temperatura del tratamiento térmico tras el proceso de conformado y unión del tubo no han sufrido cambios significativos, además todo el conjunto de fracturas se ha producido por zonas alejadas de la zona de unión, siendo esta última mucho más resistente que el material base.

#### 1.4.8 Soldadura de alta frecuencia Vs soldadura CO<sub>2</sub>

Llegados a este punto, es necesario comparar la soldadura CO<sub>2</sub> con otro tipo de soldadura que se utilice en los procesos en continuo de fabricación de tubo de acero inoxidable ferrítico, esta es la soldadura por alta frecuencia, su abreviatura HF (*High Frequency*).

##### 1.4.8.1 Principio soldadura HF

Para soldar una chapa de fleje perfilada sin aporte de material se necesita aportar calor para fundir los bordes y generar presión para mantener unidos los dos bordes. En este caso el aporte energético se produce a través de la inducción electromagnética, esta sigue el principio de la ley de Faraday – Lenz

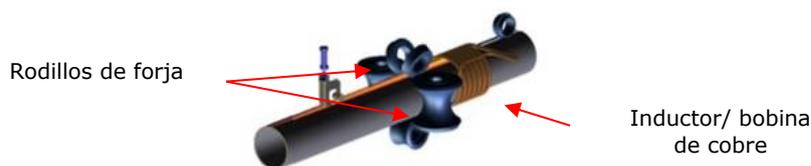


Figura IV.120 Elementos en una soldadura por HF

En esta imagen se pueden observar los dos focos necesarios para producir una soldadura. El grupo de rodillos es el encargado de someter el material a presión, para mantenerlo junto, y la bobina de inducción (inductor) junto con el impeder son los encargados de hacer que el material llegue a la temperatura de fusión (superior a los 1200°C), este calor es generado en la superficie del tubo a través de la corriente de flujo por inducción.



Figura IV.121 foto de soldadura cedida por flinsa

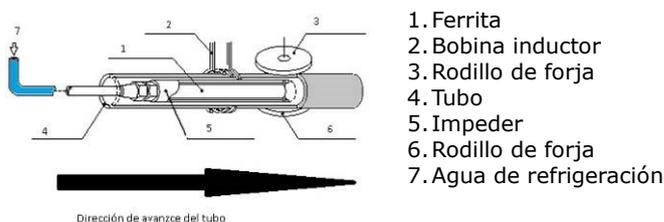


Figura IV.122 Descripción de los elementos en la soldadura HF

En este punto el material en estado fundido es sometido a presión con el cabezal de forja, uniendo los dos bordes del tubo y haciendo expulsar el exceso de material fundido generando los cordones interno y externo de soldadura. La soldadura trabaja en un ambiente de atmósfera protectora, para minimizar cualquier posible oxidación e impureza ya que estas no son expulsadas completamente cuando son presionados en estado fundido. El gas protector puede ser argón, nitrógeno o helio, dependiendo de la potencia utilizada en la soldadura. La parte superior del cordón de soldadura es obligatoriamente acuchillada para dejar el perfil con un buen acabado y lo más regular posible, y la parte interna sólo es eliminada en el caso en que el siguiente proceso lo necesite, de manera habitual también es eliminado el cordón interior, debido a que este tipo de producto sufre deformaciones y es necesario remover el cordón interior.

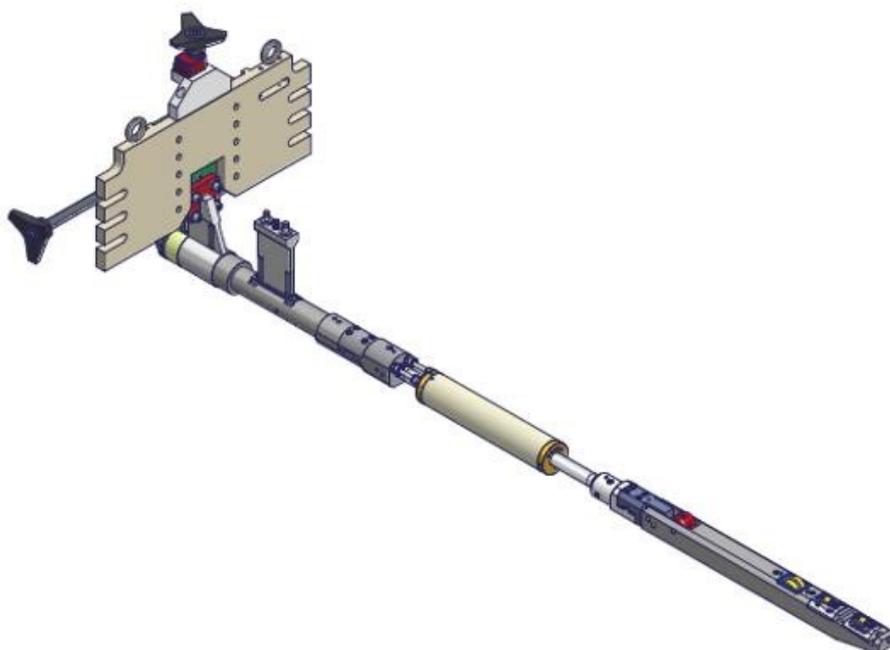


Figura IV.123 Sistema de acuchillado interior, de la empresa F.U.L. srl

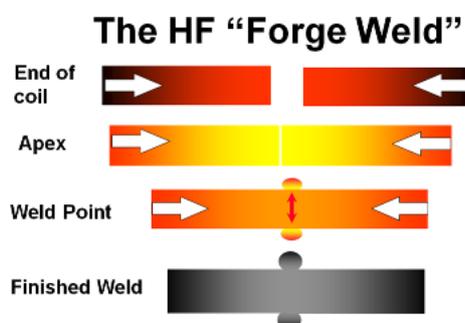


Figura IV.124 Etapas del material en el proceso de soldadura (cortesía de Thermatool)

En esta figura, se pueden apreciar las etapas por las que pasa el material desde que se le aporta la energía necesaria para su fusión, hasta que por presión se juntan los

bordes y se hace fluir el material fundido hacia el exterior, que es cuando se genera el cordón de soldadura tanto interno como externo.

#### 1.4.8.2 Tipo de cordones

Previa a la preparación metalográfica la observación del cordón de soldadura a nivel macroscópico permite observar diferencias significativas referentes a la zona afectada térmicamente.

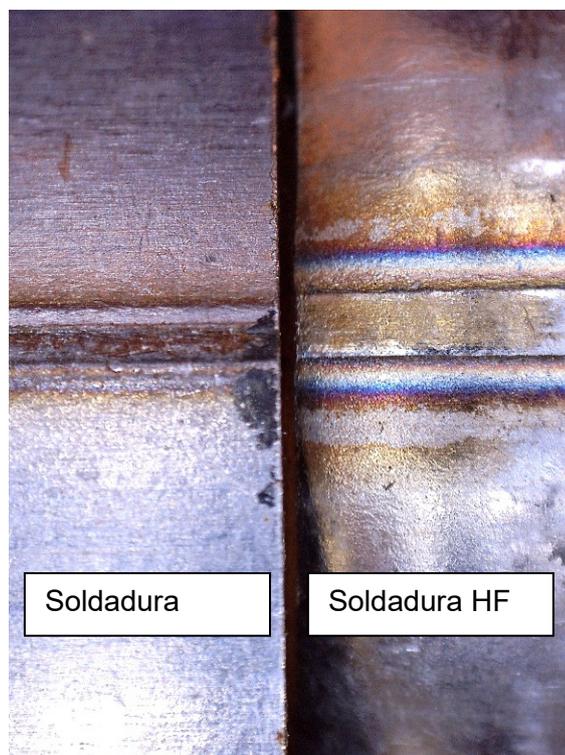


Figura IV.125 Imagen comparativa entre el tamaño de cordón realizado por Hf y mediante láser.

Tabla IV.31 Anchura media del tamaño de la soldadura

Proceso	Anchura (mm)	Anchura total (mm)
<b>Soldadura láser</b>	0,47	1,96
<b>Soldadura Hf</b>	2,62	8,24

Todo parece indicar que el cordón de soldadura de alta frecuencia es mucho más homogéneo, aunque la zona afectada es mayor que cuando se hace uso de la soldadura láser.

**Soldadura laser**

Figura IV.126 vista frontal cordón de soldadura laser.

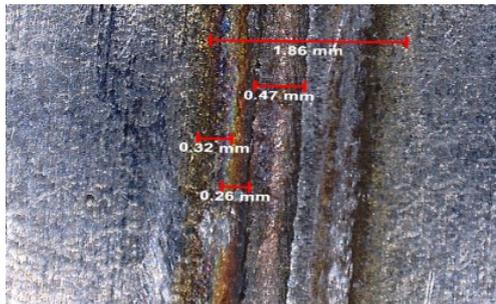


Figura IV.128 Macrografía del cordón de soldadura laser a 50X.

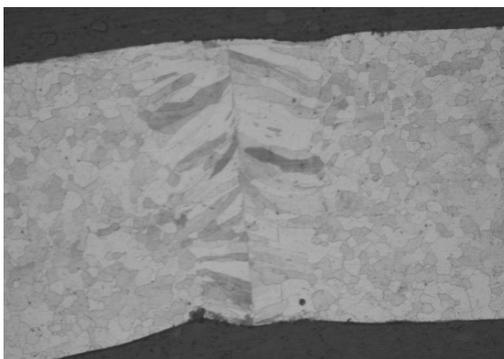


Figura IV.130 Micrografía cordón de soldadura laser a 100X.

**Soldadura HF**

Figura IV.127 Vista frontal cordón de soldadura de alta frecuencia.



Figura IV.129 Macrografía del cordón de soldadura de alta frecuencia a 50X.

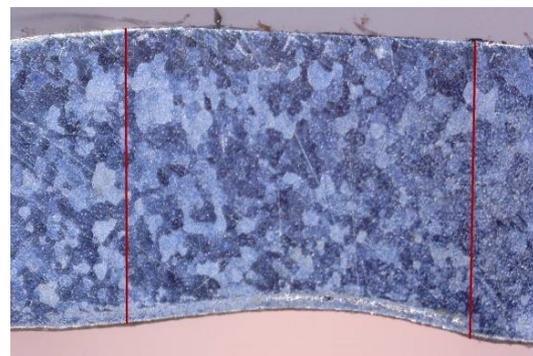


Figura IV.131 Micrografía cordón de soldadura de alta frecuencia a 100X.

Si a nivel macroscópico existen diferencias, es de esperar que estas diferencias también existan a nivel microscópico, la preparación metalográfica permite observar el efecto de la soldadura sobre el tipo de grano generado en la zona de unión.

Una de las primeras diferencias que se pueden observar en función del tipo de sistema de soldadura utilizado es la modificación del tipo de grano. En el caso de la soldadura laser la zona afectada térmicamente presenta un tipo de grano columnar con cierta orientación hacia la parte externa del tubo. Esta modificación del tipo de grano permite localizar con facilidad la línea de unión de ambos extremos del fleje conformado. En cambio, el uso de la soldadura de alta frecuencia no implica cambios en el tipo de grano, la estructura equiaxial es continua tanto en el material base como en la zona de unión.

La principal diferencia que se observa entre las dos soldaduras son los efectos del proceso térmico que ha provocado esta. Teniendo como resultado en el procesado mediante soldadura láser unos granos alargados en forma de dendritas, característico de un enfriamiento a velocidad muy elevada, con una resistencia y dureza superiores a los del material base, mientras que, en la soldadura por HF, el enfriamiento ha sido más lento, dando lugar a granos más uniformes, aunque ligeramente superior de tamaño que el material base y con una dureza y resistencia ligeramente inferior al material base.

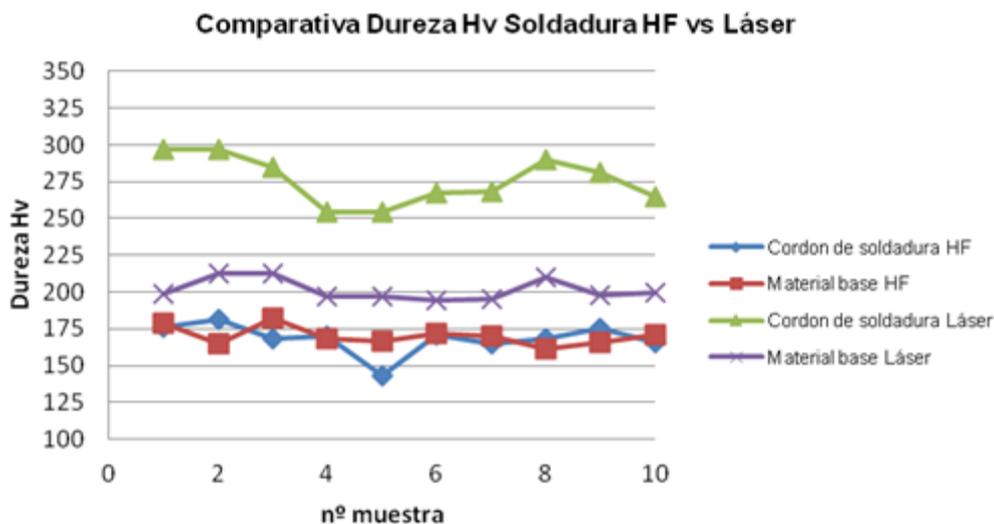


Figura IV.132 Gráfica comparativa soldadura y material base en HF y láser.

Zona de soldadura donde se han pinchado las durezas:

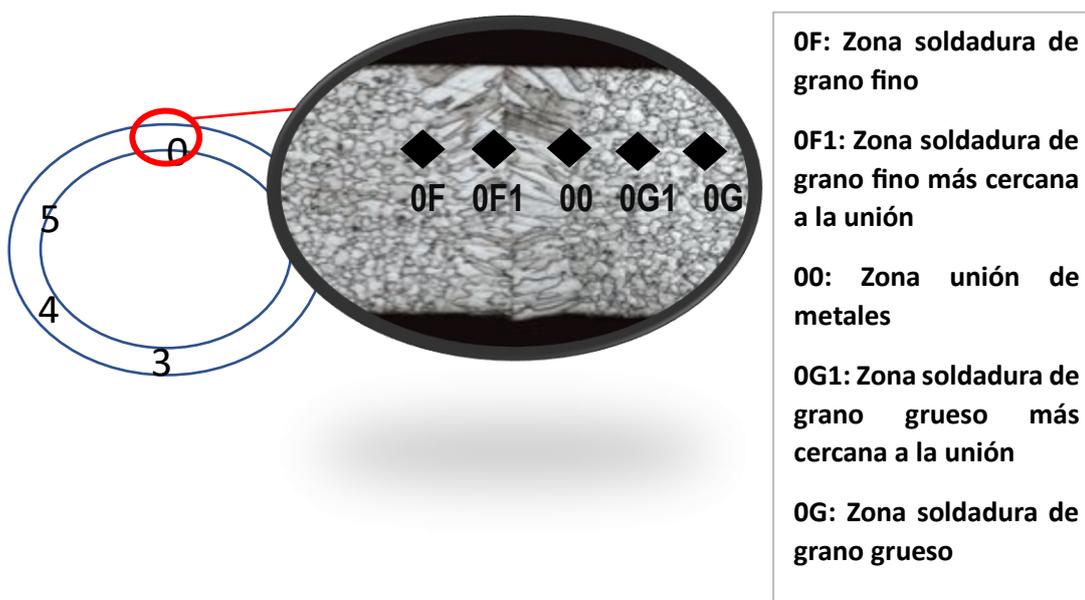


Figura IV.133 Descripción de las zonas para pinchar microdureza

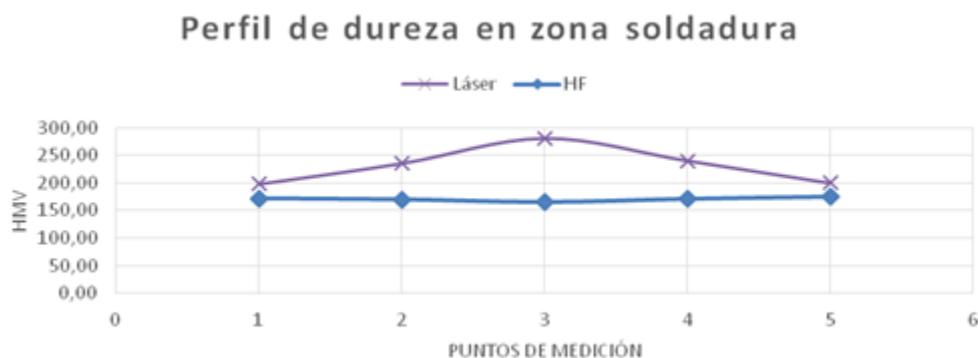


Figura IV.134 Perfil de microdureza a lo largo de las zonas marcadas

También es apreciable como la ZONA AFECTADA ZAT en la soldadura mediante HF, es mayor que en la soldadura láser.

Observando la imagen también se puede ver como el material soldado mediante la tecnología HF, ha tenido que ser acuchillado interior y exteriormente, para su posterior procesado, a diferencia del procesado mediante la tecnología láser, no ha necesitado de esa operación. En este punto es donde se ve como la sección es menor en HF, pudiendo ser un punto crítico cuando el tubo se está procesando para hacer una pieza final de la parte de un sistema de extracción de gases de un vehículo propulsado con motor de combustión.

#### 1.4.8.3 Conclusiones parciales.

En esta parte del estudio se puede concluir, que el material soldado mediante el proceso HF provoca una menor modificación en la estructura de los granos en la ZAT, aunque reduce su resistencia en una zona mayor que el material procesado mediante soldadura láser.

Otra conclusión que cabe nombrar es la diferencia de velocidad en el enfriamiento de la soldadura entre las dos técnicas, presentando la tecnología de CO<sub>2</sub>, una velocidad de enfriamiento muy superior a la de HF, de ahí la morfología diferente, generando la soldadura CO<sub>2</sub> granos alargados característicos de enfriamientos muy rápidos, y en la HF, no se nota la huella térmica de la soldadura,

La dificultad de procesar materiales ferríticos de espesor 0.8mm o inferiores descordonados tanto interior como exteriormente viene debida a la estabilidad del proceso para mantener perfectamente alineados los bordes de soldadura, la estabilidad de la cuchilla para arrancar el cordón interior, esta dificultad se incrementa con el aumento de velocidad y la disminución de espesor.



## **V. CONCLUSIONES**



Tras todos los análisis elaborados, dando solución a cada una de las posibles causas que generan la soldadura no conforme en el tubo, haciendo que esta falle cuando es sometida a los ensayos destructivos se puede concluir.

1. El material a procesar debe venir de acuerdo con unos requerimientos mínimos en cuanto al:
  - a. Tamaño de grano y distribución de impurezas.
  - b. % de elementos aleantes.
  - c. Propiedades mecánicas.
  - d. Borde de fleje, sin rebabas, ni ondulaciones, libre de aceites, grasas y humedades.

Este apartado queda resuelto con la ficha de compra para los materiales de acero inoxidable ferrítico.

2. Es muy importante tener el proceso estandarizado y controlado, dejando registro de todos los parámetros críticos de soldadura como son:
  - a. Preparación de utillaje y regulación.
  - b. Parámetros de soldadura:
    - i. Posición focal.
    - ii. Posición en X de los rodillos de soldadura.
    - iii. Potencia de soldadura.
    - iv. Presión de los rodillos de soldadura.
    - v. Regulación de los gases de protección.

Este apartado queda resuelto con el estándar de proceso donde se recogen todos estos parámetros para tener un proceso estable.

3. La limpieza de los bordes es de vital importancia para tener una soldadura correcta, sin fallas ni puntos fríos.

Esto se ha solventado introduciendo en la líneas elementos que limpian los restos de grasa, taladrinas etc., que pudieran quedar en el fleje antes de entrar a la zona de soldadura, aunque no son eliminados al 100%, por lo que se pueden plantear nuevas alternativas a los elementos que hay actualmente.

4. Condiciones ambientales, estas son importante ya que parecen ser la causa de la fragilización de la soldadura, se piensa que viene debida a la difusión de hidrógeno hacia la soldadura, producto de la rotura de moléculas de agua, procedentes de restos de taladrina en el fleje o que procedan de la instalación de aire comprimido.

Aunque se han introducido elementos que purifican y mejoran la calidad del aire comprimido en la instalación y la limpieza de los bordes, no está resuelto al 100%, ya que, aunque no se ha podido demostrar con las técnicas empleadas los fenómenos de difusión del hidrógeno siguen presentes en la soldadura.

Todos los experimentos que se han desarrollado en los capítulos anteriores han tenido como resultado que a mayor porcentaje de Cromo mayor es el efecto del hidrógeno en la soldadura y su fragilización. De igual manera ocurre con el espesor, a mayor dimensión en el espesor mayor es el efecto.

Tabla V.1 Comportamiento del acero inoxidable en función del tipo

<b>Grado de acero</b>	<b>Comportamiento</b>
<b>1.4512</b>	Mejor
<b>1.4509</b>	Intermedio
<b>1.4510</b>	Peor

A mayor espesor es necesario incrementar potencia de soldadura, además de bajar la velocidad de trabajo, esto hace una mayor afectación térmica aumentando la probabilidad de romper moléculas de agua generando hidrógeno en la zona de la soldadura, que será difundido a la soldadura y atrapado cuando se solidifique.

La solución que se ha aplicado para tener seguridad en el proceso de soldadura ha sido implantar un ensayo destructivo de abocardado, y aplastado a 0° y 90° de la soldadura, después de haber pasado las probetas por la estufa con un tiempo de permanencia fijo, además de mantener en cuarentena los productos fabricados durante 48h, este es un tiempo superior al tiempo que han desvelado las pruebas realizadas, en los cuales los ensayos destructivos de abocardado han sido satisfactorios.



## **VI. BIBLIOGRAFÍA**



- Castro R (1975) *Welding metallurgy of stainless and heatresisting steels*. University Press, Cambridge
- Cobb HM (2010) *The history of stainless steel* [electronic resource]. ASM International, Materials Park, Ohio
- D. Dunn B (2016) *Materials and Processes*. Springer International Publishing, Cham
- Dawes C (1992) *Laser welding: a practical guide*. Abington Publishing, Cambridge, England
- Dyja D, Rybarz M, Januszka A (2018) Role of the stabilizing elements in the ferritic stainless steel on the durability, corrosion properties and microstructure of the stainless steel weld seam. *Metall Ital* 11–18
- Geels K, Fowler D, Kopp W-U, Rückert M (eds) (2007) *Metallographic and Materialographic Specimen Preparation, Light Microscopy, Image Analysis and Hardness Testing*. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959
- Klar E (2007) *Powder metallurgy stainless steels* [electronic resource]: processing, microstructures, and properties. ASM International, Materials Park, Ohio
- Lippold JC (2015a) *Welding metallurgy and weldability*. Wiley, Hoboken, New Jersey
- Lippold JC (2015b) *Welding Metallurgy and Weldability: Lippold/Welding Metallurgy and Weldability*. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ
- Rajadurai S, Afnas M, Ananth S, Surendhar S (2014) *Materials for Automotive Exhaust System*. 2:8
- Wiley J *Hydrogen-Induced Cracking*. 50
- Albístur-Goñi A, Fernández-Carrasquilla J (2008) Analysis of the hydrogen absorption and its influence on mechanical behaviour of five iron alloys. *Rev metal* 44:113–128. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2008.v44.i2.100>
- Brandaleze E, Chiapparoli W, Mansilla G, et al (2006) NITROGEN AND HYDROGEN EFFECTS ON THE MECHANICAL PROPERTIES BEHAVIOUR OF FERRITIC – PERLITIC STEELS
- Cattaneo CA (2009) UN MODELO PARA ESTUDIAR LA DIFUSION DE HIDROGENO, NITROGENO Y CARBONO EN HIERRO
- Madías J ROTURA DE BARRAS DE REFUERZO EN OPERACIONES DE DOBLADO
- Amara EH (2010) Humping Modelling in Deep Penetration Laser Welding. In: Hinduja S, Li L (eds) *Proceedings of the 36th International MATADOR Conference*. Springer London, London, pp 271–274
- Amara EH, Fabbro R (2010) Modeling of humps formation during deep-penetration laser welding. *Appl Phys A* 101:111–116. <https://doi.org/10.1007/s00339-010-5768-z>
- Berger P, Hügel H, Hess A, et al (2011) Understanding of Humping Based on Conservation of Volume Flow. *Physics Procedia* 12:232–240. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.030>
- Gu H, Shulkin B (2011) A practical use of humping effect in laser beam welding. *Journal of Laser Applications* 23:012001. <https://doi.org/10.2351/1.3538988>

- Atsushi M, Junichiro H, Osamu F (2004) Ferritic Stainless Steel for Automotive Exhaust Systems —High Heat-Resistant Ferritic Stainless Steel with High Formability for Automotive Exhaust Manifolds:
- Inoue Y, Kikuchi M (2003) Present and Future Trends of Stainless Steel for Automotive Exhaust System
- Rajadurai S, Afnas M, Ananth S, Surendhar S (2014) Materials for Automotive Exhaust System. 2:  
Materials for Automobile Exhaust Systems  
Materials Selection For Automotive Exhaust System Engineering Essay
- Castro R (1975) Welding metallurgy of stainless and heatresisting steels. University Press, Cambridge
- Cobb HM (2010) The history of stainless steel [electronic resource]. ASM International, Materials Park, Ohio
- D. Dunn B (2016) Materials and Processes. Springer International Publishing, Cham
- Dawes C (1992) Laser welding: a practical guide. Abington Publishing, Cambridge, England
- Dyja D, Rybarz M, Januszka A (2018) Role of the stabilizing elements in the ferritic stainless steel on the durability, corrosion properties and microstructure of the stainless steel weld seam. Metall Ital 11–18
- Geels K, Fowler D, Kopp W-U, Rückert M (eds) (2007) Metallographic and Materialographic Specimen Preparation, Light Microscopy, Image Analysis and Hardness Testing. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959
- Klar E (2007) Powder metallurgy stainless steels [electronic resource]: processing, microstructures, and properties. ASM International, Materials Park, Ohio
- Lippold JC (2015a) Welding metallurgy and weldability. Wiley, Hoboken, New Jersey
- Lippold JC (2015b) Welding Metallurgy and Weldability: Lippold/Welding Metallurgy and Weldability. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ
- Rajadurai S, Afnas M, Ananth S, Surendhar S (2014) Materials for Automotive Exhaust System. 2:8
- Wiley J Hydrogen-Induced Cracking. 50



## **VII. APENDICES**



## Lista de figuras

Figura I.1 Resumen cifras Gonvarri Industries. ....	15
Figura I.2 Divisiones G.I.....	15
Figura I.3 Centros productivos Gonvarri Precision Tubes .....	16
Figura I.4 Vista aérea de Flinsa .....	17
Figura I.5 Tendencia del porcentaje de chatarra .....	19
Figura I.6 Evolución de incidencias en cliente.....	19
Figura I.7 Evoluciones vehículos producidos en España .....	20
Figura I.8 Carl Benz. Primeros vehículos de combustión. 1886. ....	21
Figural.9 Línea de tubo de escape con materiales típicos .....	23
Figural.10 Diferentes componentes del tubo de escape, empresa Silenciosos Falces	24
Figura I.11 Distintas aplicaciones del acero inoxidable .....	25
Figura I.12 Fenómeno generación capa pasiva en acero inoxidable.....	25
Figura I.13 Proceso de regeneración de la capa pasiva.....	26
Figura I.14 diagrama del tipo de acero inoxidable en función del %Ni -%Cr. ....	26
Figura I.15 Estructura cristalina acero inoxidable martensítico después del temple - principales características.....	27
Figura I.16 Metalografía típica acero inoxidable martensítico después del temple. ....	27
Figura I.17 Principales aceros inoxidables martensíticos derivados del tipo 1.4006...	29
Figura I.18 Estructura cristalina acero inoxidable ferrítico - características principales. ....	30
Figura I.19 Metalografía tipo de un acero inoxidable ferrítico. ....	30
Figura I.20 Principales aceros inoxidables ferríticos derivados del tipo 1.14016 .....	33
Figura I.21 Estructura cristalina acero inoxidable austenítico - principales características .....	34
Figura I.22 Metalografía típica de acero inoxidable austenítico.....	34
Figura I.23 Principales aceros inoxidables austeníticos derivados del tipo 1.4301.....	36
Figura I.24 Microestructura acero inoxidable dúplex. (acero inoxidable austeno -ferrítico) .....	37
Figura I.25 Principales aceros inoxidables dúplex derivado del tipo 1.4462 .....	38
Figura I.26 Diagrama de Schaeffler. ....	40
Figura I.27 Ilustración esquemática del horco eléctrico de arco. <i>Handbook Outokumpu</i> . ....	41
Figura I.28 Ilustración esquemática de máquina de colada continua. <i>Outokumpu Handbook</i> . ....	41
Figura I.29 Ilustración esquemática de la línea completa de trenes de laminación <i>Steckel</i> .....	42
Figura I.30 ilustración esquemática de un tren de laminación <i>Steckel</i> .....	42
Figura I.31 ruta de laminación en frío.....	43
Figura III.1 Maquina ensayo Ibertest modelo Eurotest-500 (Flinsa) .....	54
Figura III.2 Micro durómetro Shimadzu (UPV-Alcoy).....	55
Figura III.3 Esquema de disposición muestra - salto de chispa. Thermofisher. ....	56
Figura III.4 Esquema dispositivo Espectrolab. Espectro.....	56
Figura III.5 Máquina Spectro utilizada. Flinsa.....	57
Figura III.6 Lupa digital. ....	58
Figura III.7 Microscopio óptico .....	59
Figura III.8 Microscopio electrónico de barrido.....	59

Figura III.9 Selección de la bobina (materia prima) .....	60
Figura III.10 Elección del tubo soldado .....	60
Figura III.11 Selección zona de muestra .....	60
Figura III.12 Tronzadora metalográfica .....	60
Figura III.13 Máquina de embutición .....	61
Figura III.14 Pastilla embutida con el material .....	61
Figura III.15 .- Máquina de pulir probetas metalográficas .....	62
Figura III.16 Imagen tomada a 100X en estado pulido .....	62
Figura III.17 Probeta siendo atacada con reactivo Vilella .....	62
Figura III.18 Ejemplo de ataque en material 1.4512, 100x, reactivo Villela .....	63
Figura IV.1 Micrografía correspondiente al acero 1.4509 suministrado por AC1. ....	70
Figura IV.2 . Micrografía correspondiente al acero 1.4510 suministrado por AC1. ....	70
Figura IV.3 . Micrografía correspondiente al acero 1.4512 suministrado por AC1. ....	71
Figura IV.4 Micrografía correspondiente al acero 1.4509 suministrado por AC2. ....	72
Figura IV.5 . Micrografías correspondientes al acero 1.4510 (izq) y al acero 1.4512 (der) suministrado por AC2. ....	72
Figura IV.6 . Micrografía correspondiente al acero 1.4509 suministrado por AC3. ....	72
Figura IV.7 . Micrografía correspondiente al acero 1.4510 suministrado por AC3. ....	73
Figura IV.8 Micrografía correspondiente al acero 1.4512 suministrado por AC3. ....	73
Figura IV.9 Imagen SEM de retrodispersados del acero AC1 - 1.4509. ....	76
Figura IV.10 . Distribución de elementos aleantes en el acero AC1 - 1.4509, izq Titanio, der Niobio .....	76
Figura IV.11 . Imagen SEM de retrodispersados (izq) y distribución del Titanio en el acero AC1 - 1.4510. ....	77
Figura IV.12 Imagen SEM de retrodispersados y distribución del Titanio en el acero AC1 - 1.4512. ....	78
Figura IV.13 Imagen SEM de retrodispersados y distribución de elementos aleantes en el acero AC2 - 1.4509. ....	79
Figura IV.14. Distribución del Titanio (izq) y el Niobio (der) en el acero AC2 - 1.4509. ....	79
Figura IV.15. Imagen SEM de retrodispersados (izq) y distribución del Titanio en el acero AC2 - 1.4510. ....	80
Figura IV.16 . Imagen SEM de retrodispersados (izq) y distribución del Titanio en el acero AC2 - 1.4512. ....	81
Figura IV.17. Imagen SEM de retrodispersados y distribución de elementos aleantes en el acero AC3 - 1.4509. ....	82
Figura IV.18. Distribución del Titanio (izq) y el Niobio (der) en el acero AC3 - 1.4509. ....	82
Figura IV.19 Imagen SEM de retrodispersados (izq) y distribución del Titanio (der) en el acero AC3 - 1.4510. ....	83
Figura IV.20 Imagen SEM de retrodispersados (izq) y distribución del Titanio (der) en el acero AC3 - 1.4512. ....	84
Figura IV.21 ficha de compra material acero inoxidable ferrítico .....	87
Figura IV.22 Partes de la máquina inoxidable Dreistern Flinsa. ....	89
Figura IV.23 Vista panorámica de la máquina Dreistern .....	89
Figura IV.24 . Layout de máquina genérica, (imagen de Google) .....	89
Figura IV.25 Etapas de la obtención de un tubo .....	90
Figura IV.26 Línea de corte genérica, (imagen de Google) .....	91

Figura IV.27	Esquema del proceso de conformado .....	92
Figura IV.28	sección de todas las etapas de deformación. ....	92
Figura IV.29	imagen de la izquierda etapa con paso vertical y horizontal – Imagen de la derecha gráfica de esfuerzos sobre el fleje en un paso vertical.....	92
Figura IV.30	Vista superior de la etapa del <i>fin pass</i> .....	93
Figura IV.31	Rodillo eurolls. Paso 1 .....	94
Figura IV.32	Etapa del <i>brake down</i> formación.....	94
Figura IV.33	Rodillo eurolls. Imagen superior muestra la evolución de las etapas del, Imagen inferior muestra rodillo de calibradora especial, con parte exterior libre. ....	95
Figura IV.34	Sección transversal de todos los pasos de la conformadora.....	95
Figura IV.35	imagen izquierda rodillo plano de cabeza de turco, imagen derecha cabeza de turco.....	96
Figura IV.36	Equipo de soldadura.....	96
Figura IV.37	pictograma de la zona de soldadura (imagen izquierda). Posición del cabezal y sistema de seguimiento de ranura (imágenes derechas) .....	97
Figura IV.38.-	Comparativa entre las propiedades de la luz láser y la luz normal.....	97
Figura IV.39	generador láser (imagen izquierda). Recorrido láser hasta cabezal (imagen derecha).....	98
Figura IV.40	Sistema de seguimiento de ranura. Cortesía de Trumpf maquinaria....	98
Figura IV.37	Esquema del material en la soldadura.....	98
Figura IV.42	Esquema sistema láser .....	99
Figura IV.43	Representación gráfica porcentual de la eficacia de la soldadura en función de la altura focal. ....	100
Figura IV.44	Esquema posición X sistema láser .....	101
Figura IV.45	Cabezal de soldadura.....	101
Figura IV.46	Detalle del perfilómetro de bordes del sistema de soldadura .....	102
Figura IV.47	Punto de máximo contacto en los bordes del fleje .....	102
Figura IV.48	Resultados de soldadura con respecto a la posición X. ....	103
Figura IV.49	Datos del fabricante.....	104
Figura IV.50	Potencia y velocidad para tubos de $e \leq 1\text{mm}$ .....	104
Figura IV.51	Elementos utilizados para limpieza y secado de bordes. ....	106
Figura IV.52	estándar de trabajo.....	107
Figura IV.53	Elementos sostenedor interior borde de fleje.....	108
Figura IV.50	Útil de ensamblaje instalado en la conformadora de la máquina.....	108
Figura IV.55	Útil de unión entre el sostenedor de cantos y el útil de ensamblaje. ...	109
Figura IV.56	Sostenedor de cantos posicionado entre los rodillos del cabezal de soldadura.....	109
Figura IV.57	Detalle de la pastilla Sostenedor de cantos posicionado entre los rodillos del cabezal de soldadura. ....	110
Figura IV.58	Detalle del Sostenedor de cantos posicionado en el interior del tubo. ....	110
Figura IV.59	Detalle del punto donde se realizará la soldadura en la parte final de la pastilla de soporte.....	112
Figura IV.60	Detalle de la degradación de la grasa resistente a la temperatura utilizada en la base con ruedas del sistema sostenedor de cantos. ....	113
Figura IV.61	Estado de oxidación del sostenedor de cantos tras la realización de las 4 pruebas realizadas. ....	113
Figura IV.62	Rodillo de aplastado de bordes y soporte de rodillo.....	114

Figura IV.63	Cabina de soldadura láser con soporte del rodillo aplastador instalado a su derecha.....	115
Figura IV.64	Posición del rodillo aplastador de bordes sobre el tubo antes de soldarse. ....	115
Figura IV.65	Soldadura del tubo 55x0.8 calidad 1.4512. - Tubos 55x0,8mm del inicio de la fabricación.....	115
Figura IV.66	Efecto humping.....	116
Figura IV.67	defectos producto de la velocidad de proceso. ....	116
Figura IV.68	Filtros aire comprimido Atlas copo	
Figura IV.69	Secador de aire .....	117
Figura IV.70	Cabina de soldadura.....	118
Figura IV.71	Evolución gráfica del porcentaje de rechazo con el tiempo. ....	120
Figura IV.72	Calentamiento de probetas con estufa de butano. ....	120
Figura IV.73	Evolución gráfica del porcentaje de rechazo con el tiempo de permanencia en estufa.....	121
Figura IV.74	Diseño 3D del sistema horno túnel. ....	122
Figura IV.75	Turbina montada en el sistema horno túnel. Modelo: ROBUST Soplante de alta presión. ....	122
Figura IV.76	Medidas y Datos técnicos de la turbina ROBUST Soplante de alta presión .....	123
Figura IV.73	Resistencia montada en el sistema horno túnel. Modelo: LE 5000 HT. ....	123
Figura IV.78	Medidas y Datos técnicos de la resistencia LE 5000 HT.....	123
Figura IV.79	Potenciómetro selector de la resistencia del horno túnel .....	124
Figura IV.80	Interruptor térmico de corriente de la resistencia del sistema horno túnel. ....	125
Figura IV.81	1ª prueba del sistema horno túnel. Tubo Ø60.....	125
Figura IV.82	Subsistema del horno túnel. Generación de aire mediante turbina y calentamiento con resistencia.....	126
Figura IV.83	Sistema del horno túnel. Detalle de la conexión de la boquilla-horno túnel (resistencia calefactora de aire). ....	126
Figura IV.80	Representación gráfica de los valores del selector. ....	127
Figura IV.85	Representación gráfica de los valores calculados del selector. ....	129
Figura IV.86	Valores finales estimados de temperatura de la resistencia en función de la posición del selector.....	130
Figura IV.87	Evolución del % de roturas al realizar las pruebas de soldadura según norma de forma inmediata tras la fabricación.....	131
Figura IV.88	Probeta con soldadura OK. Resiste el esfuerzo del ensayo de abocardado >25% sin rotura. ....	132
Figura IV.89	Probeta con soldadura NOK. Rompe la soldadura antes de alcanzar el % mínimo exigible de expansión.....	132
Figura IV.90	Vías de evacuación del aire caliente dentro del horno túnel. ....	133
Figura IV.91	Pegote sobre el tubo del filamento fundido de la resistencia.....	134
Figura IV.92	Definición de las temperaturas de rotura de la resistencia y la temperatura máxima de trabajo. ....	134
Figura IV.93	Disminución del porcentaje de muestras con soldadura NOK en función del tiempo de reposo del tubo tras su fabricación. ....	135
Figura IV.94	Ensayo de abocardado del tubo mediante cono a 60°. ....	135

Figura IV.95 Ensayo de abocadado a tubos con diferentes diámetros.....	136
Figura IV.96 Imágenes del fleje y el tubo en distintas fases del proceso de fabricación. .....	139
Figura IV.97 Anillos extraídos de los tubos conformados sin haber sufrido el proceso de soldadura, izquierda calibrado, derecha sin calibrar.....	141
Figura IV.98 Embutición de los anillos con las marcas para la medición de microdureza. .....	143
Figura IV.99 Valores de microdureza de diversos puntos del perímetro en diferentes estados del proceso de fabricación del tubo de 40 mm.....	144
Figura IV.100 Valores de microdureza de diversos puntos del perímetro en diferentes estados del proceso de fabricación del tubo de 45 mm.....	144
Figura IV.101 Valores de microdureza de diversos puntos del perímetro en diferentes estados del proceso de fabricación del tubo de 50 mm.....	145
Figura IV.102 Muestra embutidas para su observación mediante la técnica de FESEM. .....	146
Figura IV.103 Micrografía de la zona afectada térmicamente en un tubo de diámetro 40 mm. ....	147
Figura IV.104 Micrografía de la zona afectada térmicamente en un tubo de diámetro 45 mm. ....	148
Figura IV.105 Micrografía de la zona afectada térmicamente en un tubo de diámetro 50 mm. ....	149
Figura IV.106 Imágenes obtenidas a mil aumentos de las zonas de estudio (cerca de la superficie exterior del tubo y en el centro de la soldadura).....	151
Figura IV.107 Imágenes obtenidas a mil aumentos del material base correspondiente al tubo de diámetro 40 mm (Zona de material base 1 (der) y zona de material base 2 (izq) ).....	154
Figura IV.108 Micrografía a 1000 aumentos de la zona afectada térmicamente del tubo de 45 mm con las diversas zonas de análisis. ....	155
Figura IV.109 Micrografías y mapa de la distribución de titanio en la imagen analizada. .....	156
Figura IV.110 Imagen de una zona no afectada por la soldadura e identificación de precipitados de titanio en la zona no afectada térmicamente en el tubo de 45 mm...	156
Figura IV.111 Microestructura de la zona afectada térmicamente por el proceso de unión en el tubo de 50 mm. ....	157
Figura IV.112 Micrografías SEM de la zona afectada térmicamente por el proceso de soldadura (x1000).....	158
Figura IV.113 Imagen de una zona no afectada por la soldadura e identificación de precipitados de titanio en la zona no afectada térmicamente en el tubo de 50 mm...	158
Figura IV.114 Representación de los valores de microdureza obtenidos a lo largo de todo el perímetro del tubo equidistantes entre sí.....	162
Figura IV.115 Imágenes de las diferentes huellas generadas por la punta piramidal de diamante para la obtención de la microdureza.....	163
Figura IV.116 Valores de microdureza obtenidos en la zona afectada térmicamente del tubo de diámetro 60mm tratado térmicamente a diferentes temperaturas.....	164
Figura IV.117 Apertura del tubo de diámetro de 60 mm tras el corte por cizalla. De izquierda a derecha; tubo a temperatura ambiente, tratado a 180°C, 320°C, 510 °C y 630°C.....	164

Figura IV.118 Evolución de la Tensión Máxima a tracción de los tubos tratados térmicamente (media de cinco muestras). .....	165
Figura IV.119 Probetas tratadas térmicamente utilizadas para la obtención de la resistencia máxima a tracción. ....	166
Figura IV.120 Elementos en una soldadura por HF.....	167
Figura IV.121 foto de soldadura cedida por flinsa .....	167
Figura IV.118 Descripción de los elementos en la soldadura HF .....	167
Figura IV.123 Sistema de acuchillado interior, de la empresa F.U.L. srl.....	168
Figura IV.124 Etapas del material en el proceso de soldadura (cortesía de Thermatool) .....	168
Figura IV.125 Imagen comparativa entre el tamaño de cordón realizado por Hf y mediante láser. ....	169
Figura IV.126 vista frontal cordón de soldadura laser. ....	170
Figura IV.127 Vista frontal cordón de soldadura de alta frecuencia.....	170
Figura IV.128 Macrografía del cordón de soldadura laser a 50X.....	170
Figura IV.129 Macrografía del cordón de soldadura de alta frecuencia a 50X. ....	170
Figura IV.130 Micrografía cordón de soldadura laser a 100X.....	170
Figura IV.131 Micrografía cordón de soldadura de alta frecuencia a 100X. ....	170
Figura IV.132 Gráfica comparativa soldadura y material base en HF y láser. ....	171
Figura IV.133 Descripción de las zonas para pinchar microdureza .....	171
Figura IV.134 Perfil de microdureza a lo largo de las zonas marcadas .....	172

## Lista de tablas

Tabla I.1 Partes de los sistemas de evacuación de gases y materiales utilizados .....	22
Tabla I.2 Principales grados de aceros inoxidable martensíticos.....	28
Tabla I.3 Grados de acero inoxidable martensíticos y sus principales aplicaciones ..	28
Tabla I.4 Principales grados de aceros inoxidable ferríticos.....	31
Tabla I.5 Grados de acero inoxidable ferrítico y sus principales aplicaciones. ....	32
Tabla I.6 Principales grados de aceros inoxidable austeníticos.....	35
Tabla I.7 Grados de acero inoxidable austenítico y sus principales aplicaciones. ....	35
Tabla I.8 Principales grados de acero inoxidable dúplex.....	38
Tabla III.1 Características técnicas máquina ensayo tracción Eurotest-500.....	54
Tabla III.2 Parámetros de pulido .....	61
Tabla IV.1. Composiciones normalizadas de los aceros inoxidable ferríticos 1.4509, 1.4510, 1.4512.....	68
Tabla IV.2. Comparativa de las dimensiones obtenidas en los diferentes aceros y suministradores. ....	74
Tabla IV.3. Valores de microdureza de los diferentes aceros suministrados.....	75
Tabla IV.4. Composición de los elementos aleantes presentes en el acero AC1 – 1.4509. ....	76
Tabla IV.5. Composición de los elementos aleantes presentes en el acero AC1 – 1.4510. ....	77
Tabla IV.6. Composición de los elementos aleantes presentes en el acero AC1 – 1.4512. ....	78
Tabla IV.7. Composición de los elementos aleantes presentes en el acero AC2 – 1.4509. ....	80
Tabla IV.8. Composición de los elementos aleantes presentes en el acero AC2 – 1.4510. ....	80
Tabla IV.9. Composición de los elementos aleantes presentes en el acero AC2 – 1.4512. ....	81
Tabla IV.10. Composición de los elementos aleantes presentes en el acero AC3 – 1.4509. ....	83
Tabla IV.11. Composición de los elementos aleantes presentes en el acero AC3 – 1.4510. ....	83
Tabla IV.12. Composición de los elementos aleantes presentes en el acero AC3 – 1.4512. ....	84
Tabla IV.13. Comparativa entre la composición normalizada del acero EN – 1.4509 y la obtenida en las muestras de los diferentes suministradores. ....	85
Tabla IV.14. Comparativa entre la composición normalizada del acero EN – 1.4510 y la obtenida en las muestras de los diferentes suministradores. ....	85
Tabla IV.15. Comparativa entre la composición normalizada del acero EN – 1.4512 y la obtenida en las muestras de los diferentes suministradores. ....	85
Tabla IV.16. Temperatura del aire en función de la posición del selector del potenciómetro.....	127
Tabla IV.17. Temperatura de todas las posiciones del selector de acuerdo con la función lineal de Figura 80. ....	129
Tabla IV.18. Resultados % muestras NOK tras ensayos según norma.....	131
Tabla IV.19. Composiciones normalizadas de los aceros inoxidable ferríticos 1.4512. ....	137

Tabla IV.20. Relación de dimensiones iniciales de los flejes utilizados para la fabricación de tubos de 40, 45 y 50 mm de diámetro.....	138
Tabla IV.21. Desarrollos necesarios para la fabricación de tubos de 40, 45 y 50 mm de diámetro.....	139
Tabla IV.22. Dimensiones iniciales del tubo previo al proceso de soldadura.....	140
Tabla IV.23. Separación entre bordes de fleje de los diferentes diámetros, tanto del fleje conformado como de los anillos extraídos para el estudio. ....	142
Tabla IV.24. Dimensión de la zona afectada térmicamente en función del diámetro de tubo utilizado. ....	149
Tabla IV.25. Composición de la zona de soldadura correspondiente al tubo de diámetro 40mm .....	153
Tabla IV.26. Composición del material base correspondiente al tubo de diámetro 40mm .....	154
Tabla IV.27. Composición del material base y la zona de soldadura correspondiente al tubo de diámetro 45 mm. ....	157
Tabla IV.28. Composición del material base y la zona de soldadura correspondiente al tubo de diámetro 50 mm. ....	159
Tabla IV.29. Valores de composición obtenidos a 3000 aumentos de diversas zonas en los diámetros 40, 45 y 50 mm. ....	161
Tabla IV.30. Valores de la apertura del tubo de diámetro 60 mm tras el corte por cizalla en función de la temperatura de tratamiento.....	165
Tabla IV.31 Anchura media del tamaño de la soldadura .....	169
Tabla V.1 Comportamiento del acero inoxidable en función del tipo .....	177