

PROGRAMA ASTURIAS 2016-2017

RESULTADOS DEL PROYECTO:

**SOLDEO ROBOTIZADO PARA FABRICACIÓN DE PIEZAS COMPLEJAS POR
SOLDADURA ADITIVA**

REFERENCIA Nº: IDI/2016/000297

Entidad Beneficiaria:



Fecha inicio: 01/10/2016

Fecha fin: 30/12/2017

1 INTRODUCCIÓN

El mercado progresivamente demanda productos personalizados y con reducidos plazos de entrega, prestándose especial atención a la reducción de los tiempos de puesta en el mercado.

Ante este desafío, ha surgido un nuevo concepto de fabricación, que se está posicionando en el mercado como pieza clave a la hora de dar respuesta a estos requerimientos, gracias a su gran libertad de diseño y su rápida capacidad de respuesta, este nuevo concepto de fabricación está basado en las denominadas “tecnologías de fabricación aditiva”: procesos de unión de materiales para crear objetos, usualmente capa a capa, a partir de datos de un modelo en 3D, de forma opuesta a las técnicas de fabricación sustractiva.[1]

Este proyecto pretende analizar los conceptos principales de la fabricación aditiva aplicando tecnologías convencionales y a la par productivas, como la soldadura GMAW con protección de gas y sus últimas evoluciones adaptadas a un brazo robotizado para la ejecución de recrecimiento controlado por recargue mediante procesos de soldadura por arco robotizados así como integración de varios sistemas de apoyo para detectar posición relativa del robot, control de defectos en línea, realización de precalentamiento en línea por delante del arco de soldadura y generación de sólidos complejos a través de trayectorias determinadas de forma automática con softwares específicos de robot.

Por lo tanto, este proyecto se basa en los grandes avances que se están experimentando en robótica y los sistemas de soldadura automatizados para su uso en la fabricación aditiva.

Hoy en día sectores de gran impacto en la sociedad como el de automoción, el aeronáutico o biomedicina imponen no solo requerimientos geométricos o de forma, sino también mecánicos y microestructurales, lo que hace necesario profundizar de forma exhaustiva en la determinación de parámetros necesaria, en las propiedades mecánicas y características de los productos obtenidos mediante procesos aditivos.

2 OBJETIVOS Y GRADO DE CUMPLIMIENTO

En el proyecto se plantean los siguientes objetivos:

1. Determinar un método de generación de trayectorias en un robot de forma automática (eliminando programación punto a punto) a través un sistema off line que permita, a partir de un diseño 3D importado, recrear la pieza por soldadura con arco.
2. Conocer la ecuación y forma exacta de los distintos arcos de soldadura (forma de las ondas de tensión y corriente) que ofrecen las nuevas versiones de las máquinas de soldadura GMAW avanzada. La correlación de las formas de esos arcos y sus baños con las formas de sus ondas permitirán un mayor nivel de precisión en la fabricación por additive welding.
3. Integración de sistemas de detección de junta on-line que permitan mayor precisión en el posicionamiento del baño de soldadura durante la fabricación de piezas con esta tecnología. Estos sistemas han de gestionar las deformaciones producidas por el material durante su recreado por soldadura.
4. Desarrollo de sistemas de control de defectología y variación de forma en los baños de recarga aditivo, que permita una mayor calidad en el material que constituye la piezas, libre de defectos abiertos, inclusiones, grietas, y otro tipo de indicaciones que modifican la calidad de la pieza.
5. Análisis de la integración de otras tecnologías de soldadura a la temática de additive welding como es la soldadura por haz de electrones.

3 ACTIVIDADES REALIZADAS

3.1 GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS EN UN ROBOT DE FORMA AUTOMÁTICA (HITO 1)

El objetivo de este hito es el desarrollo de un método de generación de trayectorias en un robot de forma automática, es decir, eliminando la programación punto a punto, a través de un sistema off line que permita recrear la pieza por soldadura con arco a partir de un diseño 3D importado.

3.1.1 Desarrollar sistemática de trabajo para la programación off line (T.1.1).

El software que se ha empleado para la generación de trayectorias ha sido el programa MASTERCAM. Este programa permite realizar simulaciones precisas de secuencia de movimientos del robot necesarias en este tipo de fabricación, y descargar los programas en los controladores reales de los robots. Con este programa se pretende reducir costes, incrementar la calidad y reducción de los plazos de entrega.

La primera tarea desarrollada en este hito ha consistido en el desarrollo de la sistemática de trabajo para la programación off-line (T.1.1). La

Figura 1 muestra los pasos para realizar las trayectorias para fabricación aditiva con el programa Mastercam.

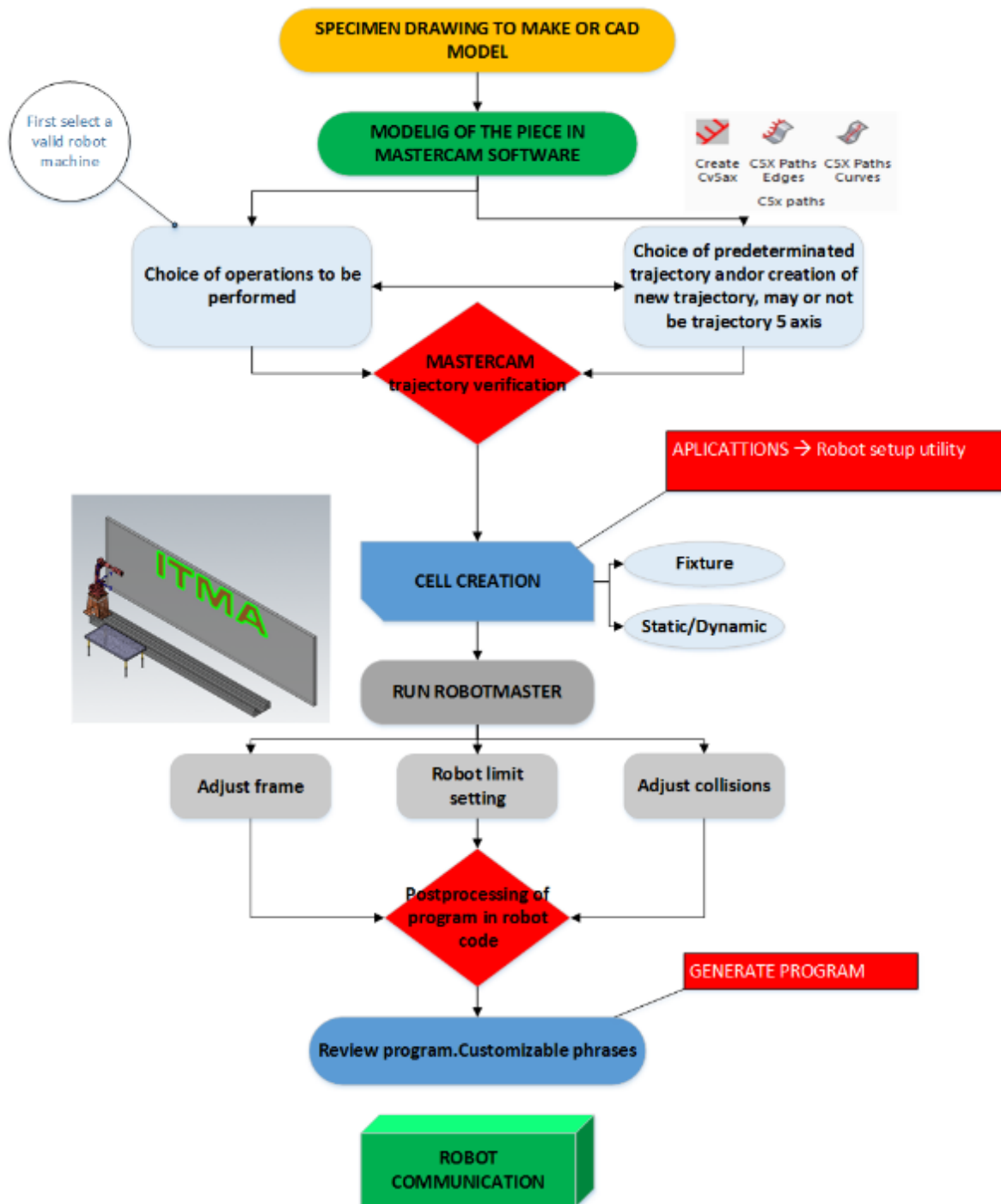


Figura 1. Estructura del programa

Para la definición de la sistemática se han realizado una serie de pruebas. (Ver Figura 2)

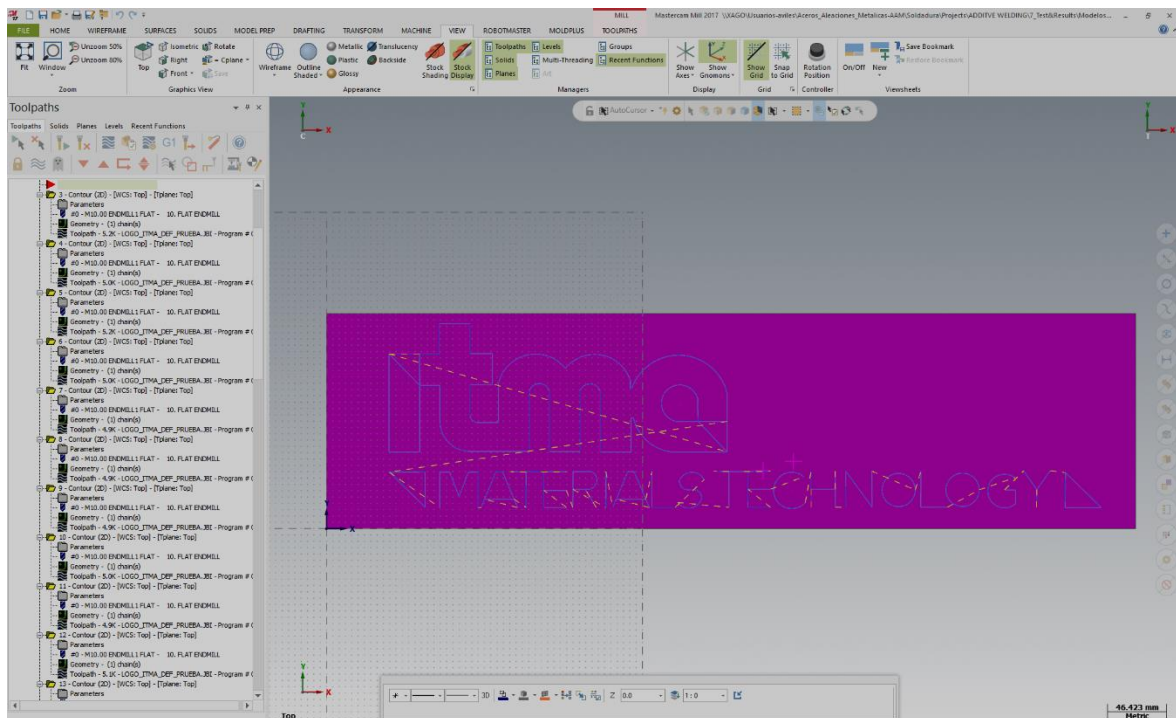


Figura 2. Programa de generación de trayectorias

Una vez definida la sistemática de trabajo, se realizaron diferentes pruebas de concepto con Mastercam para comprobar la calidad de las estrategias generadoras de trayectorias automáticas, así como la correcta interpretación por parte de los robots de ITMA de las líneas de programa generadas por el SW (T.1.2).

El proceso de soldadura utilizado ha sido GTAW en todos los casos con un diámetro de electrodo de tungsteno de 3,2 mm. Los consumibles utilizados en este estudio son base níquel.

El primer análisis que se ha realizado fue una trayectoria compleja, en este caso el logo de Fundación Itma. Antes de realizar el 3D con el programa Mastercam se seleccionaron las dimensiones de la chapa sobre las que se iban a realizar (500X150X10 mm).

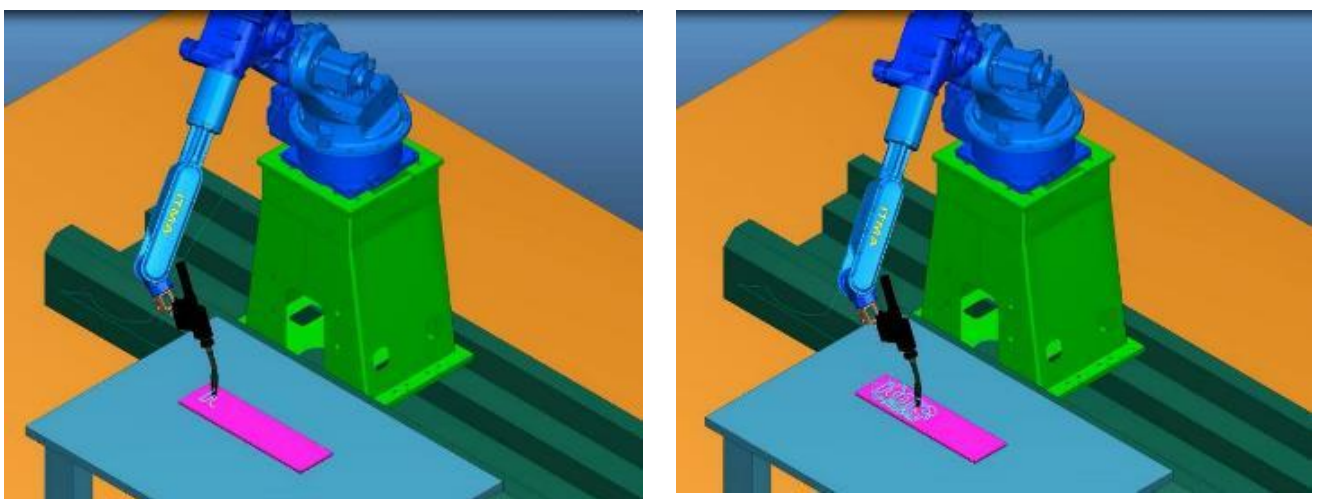


Figura 3. Simulación de trayectorias con el programa Mastercam.

Una vez obtenidas las trayectorias se cargaron en el Robot YASKAWA DX 100. Los parámetros de soldado utilizados son los mostrados en la Tabla 1. El consumible utilizado es el UPT A6222 Mo con diámetro de 1 mm sobre chapa de acero al carbono.

Tabla 1. Parámetros de soldadura para piezas con trayectoria compleja.

Intensidad (A)	Voltaje (V)	Velocidad (cm/min)	Velocidad hilo (m/min)	Stick out (mm)	Caudal de gas (l/min)	Amplitud (mm)	Frecuencia (Hz)	Gas
150	15	7	1,8	4	16	5	0,5	Ar 100

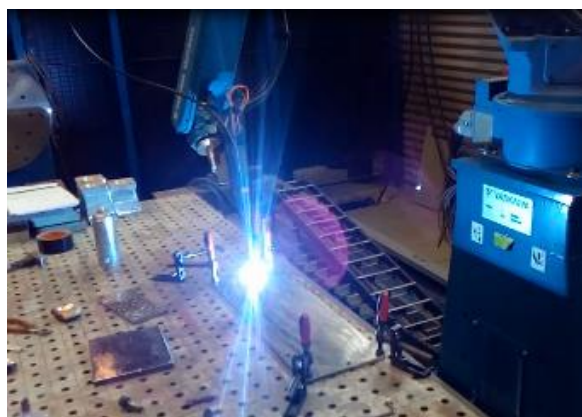


Figura 4. Trayectoria Logo Itma.



Figura 5. Aspecto final del logo de ITMA

Con la sistemática de trabajo elegida, como se puede ver en la Figura 5, el robot consigue realizar la trayectoria obtenida mediante la programación off-Line.

3.1.2 Pruebas de concepto de programación offline en piezas sencillas (T1.2).

Una vez comprobado que la sistemática de trabajo elegida era correcta, se realizaron diferentes pruebas de parámetros sobre diferentes configuraciones. En primer caso sobre pared plana, que es la configuración más sencilla, hasta la configuración recrecida sobre tubo con trayectoria de álabe, más compleja.

a) Recrecimiento sobre pared plana

Con estas pruebas se pretende saber el espesor del material depositado para introducir en Mastercam de forma más precisa lo que sube cada capa. Mediante proceso robotizado se ha depositado una fina capa de UTP A068 HH con un diámetro de hilo de 1,0 mm sobre pared plana. Los parámetros utilizados se muestran en la Tabla 2. Las pruebas se realizaron sobre chapa de acero al carbono. El proceso de soldeo utilizado es el GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)

Tabla 2. Parámetros de soldadura para el recrecimiento de pared.

Intensidad (A)	Voltaje (V)	Velocidad (cm/min)	Velocidad hilo (m/min)	Stick out (mm)	Caudal de gas (l/min)	Amplitud (mm)	Frecuencia (Hz)	Gas
155	14,5	5	1,9	4	16	6	0,5	Ar 100 %



Figura 6. Pared plana recrecida.

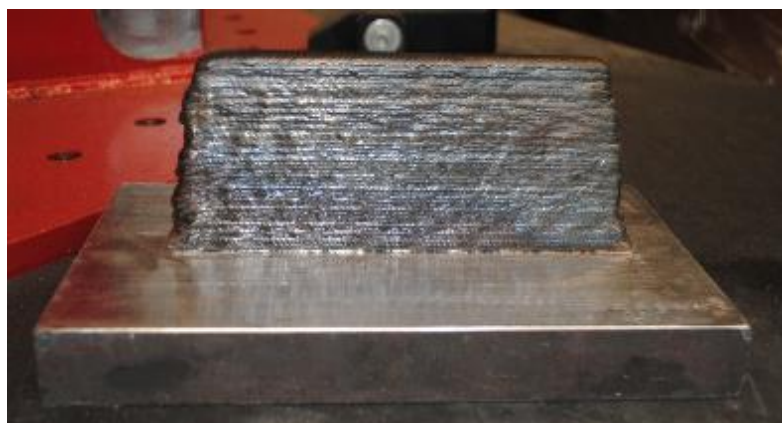


Figura 7. Pared plana recrecida (2).

El recrecimiento sobre pared plana con trayectoria rectilínea tiene unas medidas de 80x160 mm y 30mm. En esta parte se ha realizado una macrografía para determinar con precisión la altura del

material depositado y también se han realizado durezas HV1, para determinar si el calor aportado durante el proceso aumentaba la dureza en la zona afectada térmicamente.

Examen macrográfico

La probeta de ensayo fue preparada y atacada de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 17639:2013 por una de sus caras para revelar claramente la línea de fusión, la zona afectada térmicamente (ZAT) y las diferentes pasadas. El examen macroscópico incluye también parte del metal base no afectado.



Figura 8. Macrografía de pared plana recocida.

En la macrografía se aprecia la zona afectada entre el metal base y el metal de aporte de aproximadamente 3 mm de longitud. El objeto de esta tarea era saber el espesor de cada capa que mide 2,5 mm para poder introducir en el programa con mayor precisión.

Se puede observar además que para quitar las ondas dejadas durante el proceso, se realizó un refundido con el proceso GTAW de la parte derecha a la parte izquierda. En esta parte se observa una mayor influencia del calor, y más en la parte izquierda, seguramente porque el robot estaría más tiempo que en el resto de partes ya que es dónde se cerraba la soldadura.

b) Pruebas sobre tubo

Una vez que se diseñaron trayectorias con geometrías complejas y sobre paredes rectas, se cambió el consumible a un UPT A6222 Mo-3 pero manteniéndose el proceso de soldeo GTAW. Se realizaron 30 pruebas sobre tubo, variando los parámetros para conseguir una deposición con buenas propiedades y buena vistosidad y poder sincronizar los movimientos del posicionador con los del robot mediante la programación off-Line. El tubo estaba colocado en el posicionador e iba girando al mismo tiempo que el robot iba soldando en línea recta y avanzando hacia delante. Los parámetros utilizados en este caso, se muestran en el ANEXO 1. Para el tubo se utilizó un material St. 37 de 219, 1 mm de diámetro y 6,5 mm de espesor con una longitud de 250 mm.



Figura 9. Pruebas sobre tubo St.37.

Se realizaron 30 de parámetros, en varias de ellas se realizaron pruebas de solapamientos, la que mejor aspecto ha tenido está formada por 5 cordones. La primera capa se realizó con 2 Hz cerrando en el centro, es decir, primero un cordón en la derecha otro a la izquierda y un último en el centro, y la segunda capa con los mismo parámetros pero disminuyendo la frecuencia a 1 Hz. Debido al aspecto del resto de cordones que no tenían buena vistosidad o eran demasiado anchos para fabricación aditiva, se seleccionaron estos parámetros para hacer la pared recrecida sobre tubo.

c) Pruebas sobre tubo-pared

Después de obtener los parámetros adecuados, y utilizando el mismo consumible (UTP A6222 Mo-3 $\varnothing=1\text{mm}$) y el mismo proceso de soldeo GTAW, se realizó una prueba de parámetros con oscilación. Con los parámetros específicos que se detallan en la Tabla 3. Estas pruebas se realizaron sobre un tubo de acero inoxidable, de 11,4 mm de diámetro y 12 mm de espesor.

Tabla 3. Parámetros de la prueba con oscilación.

Intensidad (A)	Velocidad (cm/min)	Velocidad hilo (m/min)	Stick out (mm)	Caudal de gas (l/min)	Amplitud (mm)	Frecuencia (Hz)	Gas
150	4	0,6	3,5	16	5	0,4	Ar 100 %

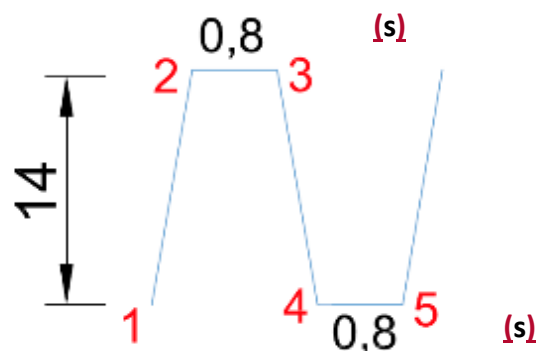


Figura 10. Patrón de oscilación (segundos).

El patrón de oscilación que se ha utilizado es el que se muestra en la Figura 10. En los puntos 23 y 45 el robot está 2 segundos avanzando en línea recta sin empezar la desviación. Se controló que la temperatura entre pasadas, en todo momento fuera inferior a 100°C. Se depositaron 10 cordones que alcanzaron una altura de 15 mm. Obteniendo así una altura de cada cordón depositado de 1,5 mm. El ancho del cordón depositado es de 14 mm.



Figura 11. Prueba de trayectoria con oscilación.

Para conseguir una mayor tasa de deposición y como consecuencia que el proceso fuese más productivo, se aumentó la intensidad. Con el objeto de poder caracterizar las propiedades mecánicas del proceso de fabricación aditiva, se realizó una pared de 130 mm de largo por 70 mm de altura.

Tabla 4. Parámetros de la prueba con oscilación.

Intensidad (A)	Velocidad (cm/min)	Velocidad hilo (m/min)	Stick out (mm)	Caudal de gas (l/min)	Amplitud (mm)	Frecuencia (Hz)	Gas
215	8	0,6	3,5	16	5	1	Ar 100 %

El patrón de oscilación sigue el mismo esquema que en el caso anterior, pero en este caso el tiempo en el que el robot sigue una trayectoria recta esta entre 1-2 segundos.

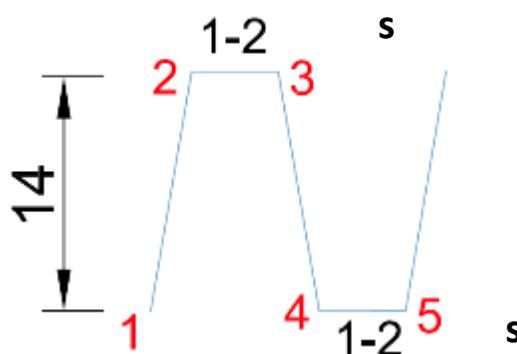


Figura 12. Patrón de oscilación (segundos).

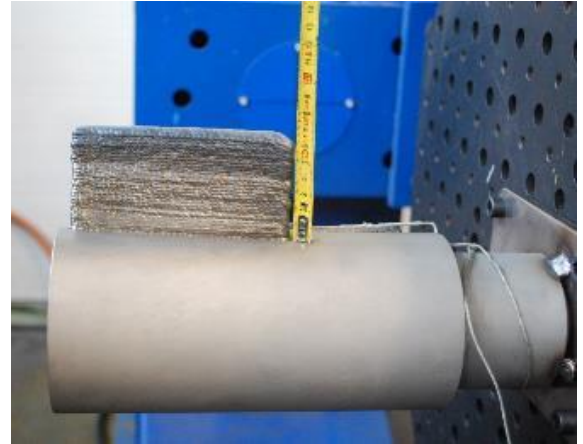
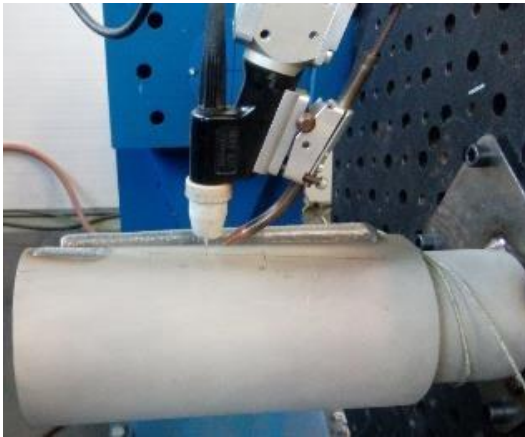


Figura 13. Probeta sobre tubo-pared (1).

Una vez realizada la pared de 70 mm de altura se realizó una pared de 30 mm de ancho y una altura de 150mm, para ver, si estos parámetros son adecuados para longitudes cortas.

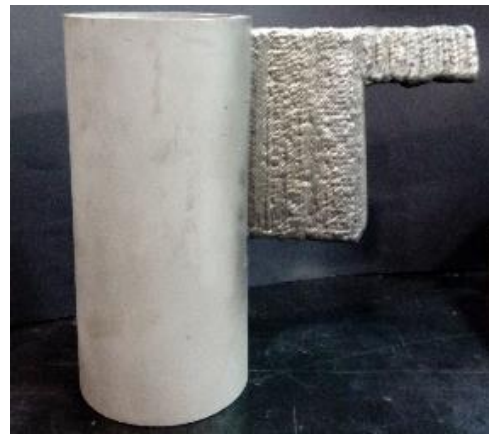
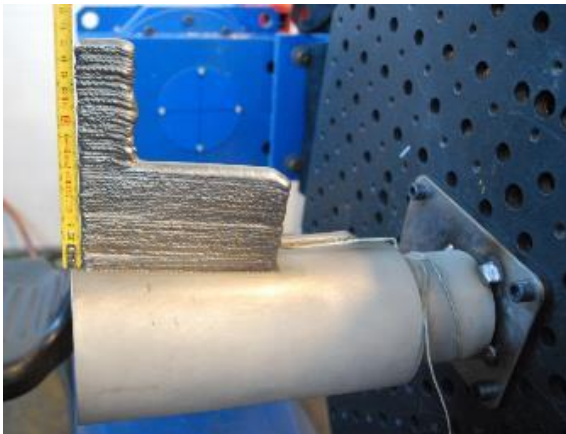


Figura 14. Probeta sobre tubo-pared (2).

Como vemos en la Figura 14, el aspecto de la zona recrecida de 130 mm, tiene peor aspecto, hay un mayor descuelgue en los laterales, ya que la acumulación de calor es mayor. Por lo que estos parámetros son adecuados para longitudes más largas.

Para caracterizar la pared recrecida sobre el tubo se han realizado en primer lugar los ensayos no destructivos, en concreto líquidos penetrantes y el ensayo radiográfico y posteriormente la extracción de una macrografía, posteriormente dos tracciones y dos juegos de charpy como se indica en la Figura 15.

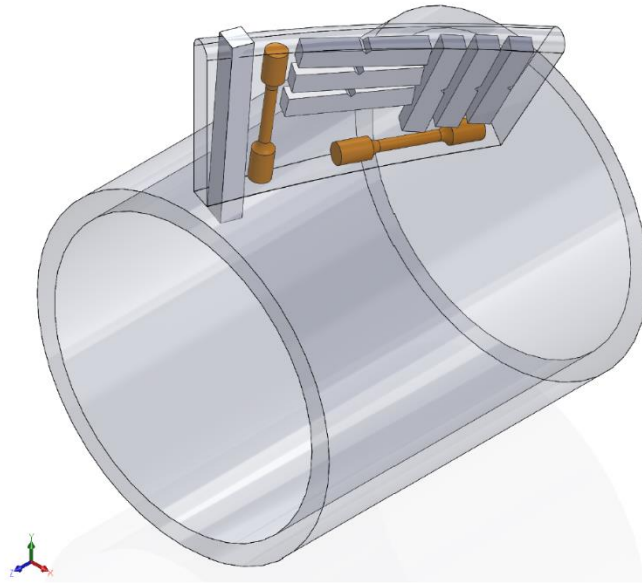


Figura 15. Posición de las probetas.

Antes de la obtención de las probetas de ensayo, los cupones de ensayo fueron examinados mediante ensayos no destructivos

3.1.2.1.1 Líquidos penetrantes

Se trata de un método de detección de defectos no destructivo, rápido, sencillo y económico, que permite determinar la existencia de defectos superficiales. La probeta se analizó de acuerdo con la norma ISO 3452-1.

El procedimiento consiste en aplicar un líquido coloreado, en este caso, en la superficie de estudio, el cual penetra en cualquier discontinuidad que pudiera existir debido al fenómeno de capilaridad. Después de un determinado tiempo se elimina el exceso de líquido (se limpia la superficie con un trapo seco) y se aplica un revelador (normalmente blanco), el cual absorbe el líquido que ha penetrado en las discontinuidades y sobre la capa del revelador se delinea el contorno de éstas.

La Figura 16 muestra las indicaciones obtenidas durante la prueba con líquidos penetrantes. En este caso se utilizaron líquidos penetrantes coloreados.

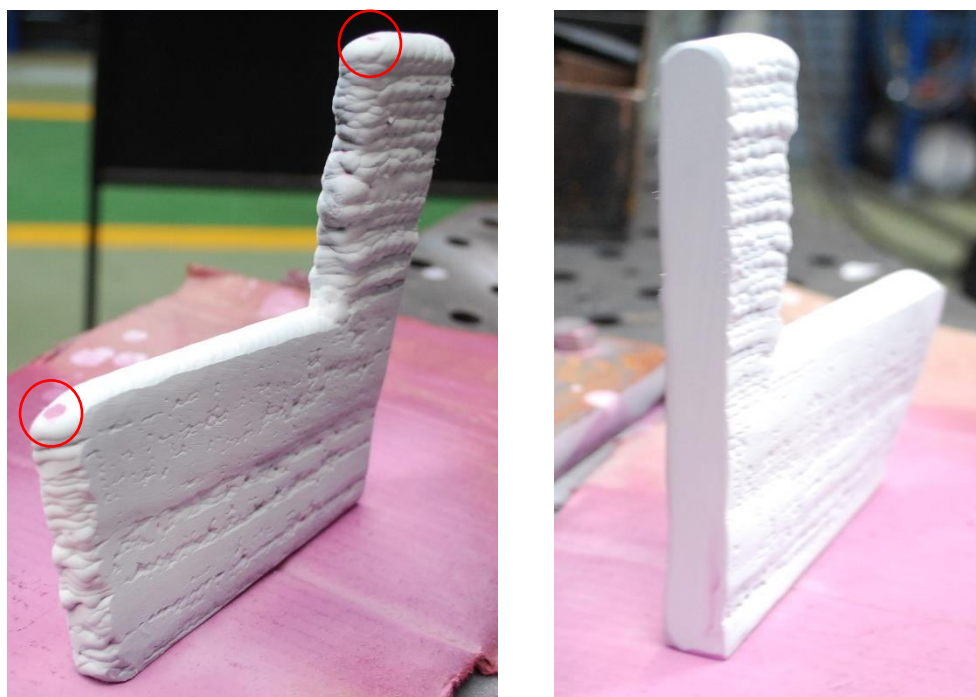


Figura 16. Líquidos penetrantes sobre la pared recrecida sobre el tubo.

Después de la realización de líquidos penetrantes no se observan defectos en la superficie. Sólo hay dos puntos que son los de parada y arranque del robot.

Con el objeto de evaluar los defectos internos se realizaron ensayos de ultrasonidos.

3.1.2.1.2 Ensayo de ultrasonidos

Los ensayos por inmersión consisten en sumergir la muestra en un tanque. En este caso la transmisión de ultrasonidos entre el palpador y la muestra se efectúa a través de una columna de líquido sin contacto directo como vemos en la Figura 17.



Figura 17. Probeta sumergida para análisis mediante ultrasonidos por inmersión.

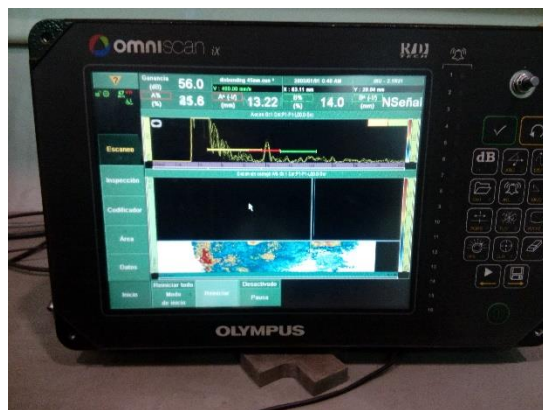


Figura 18. Pantalla de los ultrasonidos.

Una vez que se había sumergido la probeta, se observó que debido a la rugosidad superficial, al poco espesor y al tener forma helicoidal en la que no se podía apoyar la probeta en toda la

superficie y así conseguir una indecencia recta, la calibración del eco de entrada y el eco de fondo, era poco fiable, respecto a los resultados que se pudieran obtener. Para ello se decidió realizar un ensayo radiográfico.

3.1.2.1.3 Examen radiográfico

Los ensayos radiográficos permiten penetrar en una gran variedad de materiales de diferentes densidades para detectar defectos internos relacionados con la calidad de las soldaduras.

Este ensayo se ha realizado de acuerdo con la norma ISO 17636-1:2013.

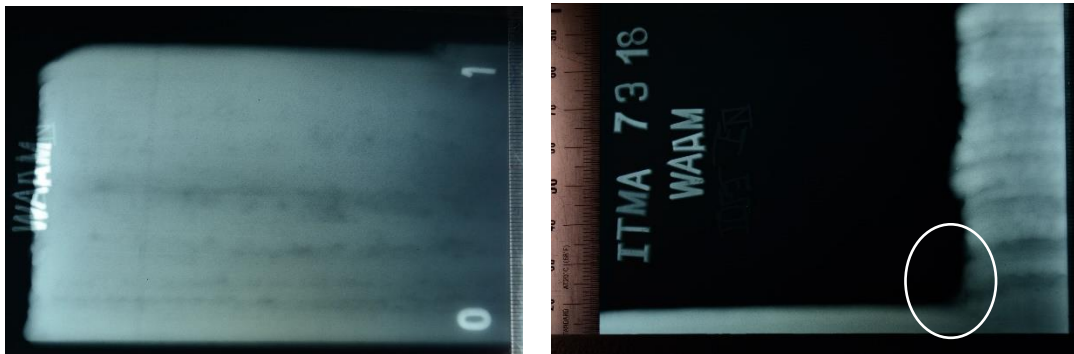


Figura 19. Resultados del examen radiográfico sobre la pared recrecida sobre tubo.

Como se puede ver en la parte izquierda de la Figura 19, las marcas que se ven son las pasadas realizadas, no se han detectado defectos. En la parte derecha de la Figura 19, se puede ver una porosidad en la parte baja de la pared, por el inicio del arco.

3.1.2.1.4 Exámenes macroscópicos

La probeta de ensayo fue preparada y atacada de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 17639:2013 por una de sus caras para revelar claramente la línea de fusión, la zona afectada térmicamente (ZAT) y las diferentes pasadas. El examen macroscópico incluye también parte del metal base no afectado.

La Figura 21 muestra una reproducción macrográfica correspondiente a la zona recrecida de la chapa plana y del tubo.

Los niveles de aceptación fueron acordes con la UNE-EN ISO 5817:2014.

En la Figura 20 se señalan las partes que corresponden con la macrografía, la macrografía como ya se ha mencionado, fue cortada transversalmente a la dirección de soldadura.

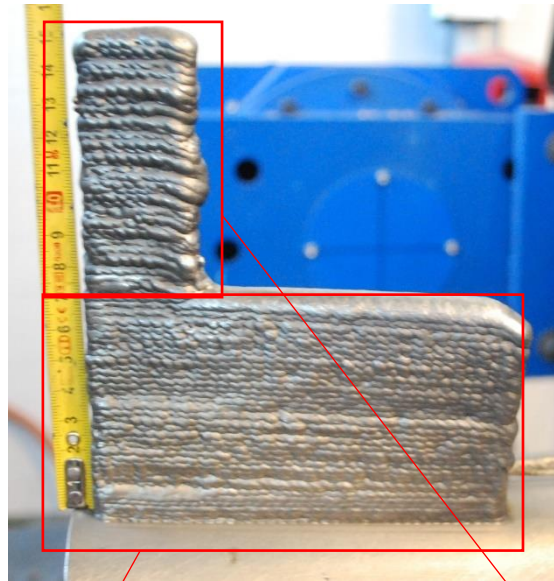


Figura 20. Partes de la pared recrecida

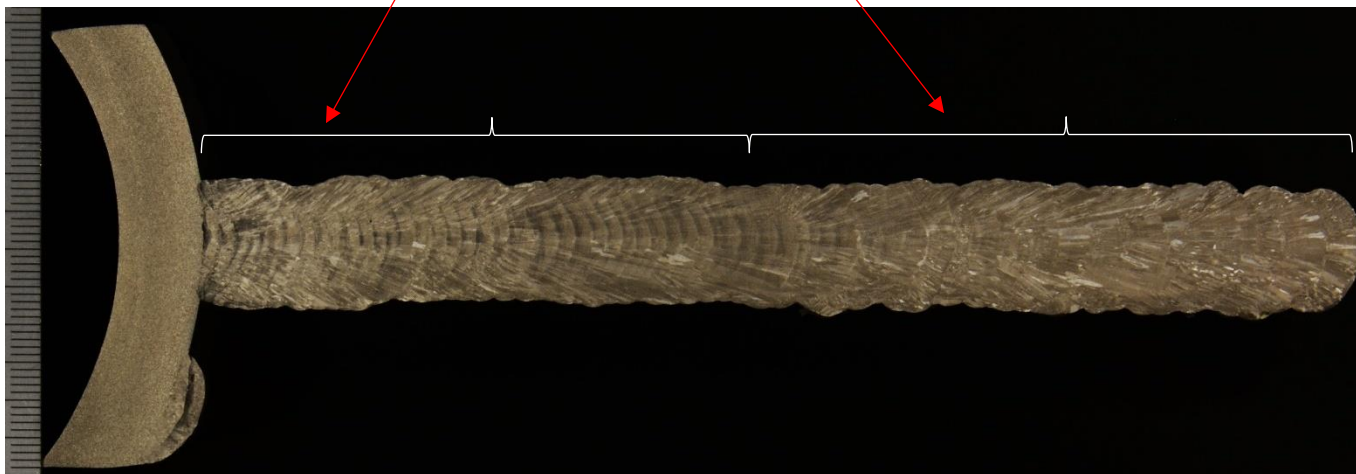


Figura 21. Macrografía de la pared recrecida en el tubo.

En el examen macroscópico realizado, se pueden distinguir dos zonas, la primera corresponde a la parte más cercana al tubo (izq. de la macrografía), que tiene una longitud de 70 mm aproximadamente, que presenta una estructura regular con múltiples pasadas. Para los parámetros de soldeo utilizados, se puede observar una adecuada fusión entre el material de aporte y el metal base. La parte de la derecha de la macrografía al tener menor longitud, existe una mayor acumulación de calor, con velocidades de enfriamiento más lentas lo que hace que se produzca un mayor crecimiento de grano dentrítico.

3.1.2.1.5 Ensayo de dureza

Sobre la probeta donde se obtuvo la macrografía se realizaron los ensayos de dureza Vickers HV1 que se realizaron de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 6507-1.

En las probetas metalográficas, se realizarán mediciones de durezas que constaron de 3 líneas de 10 huellas cada una como se muestra en la Figura 22.

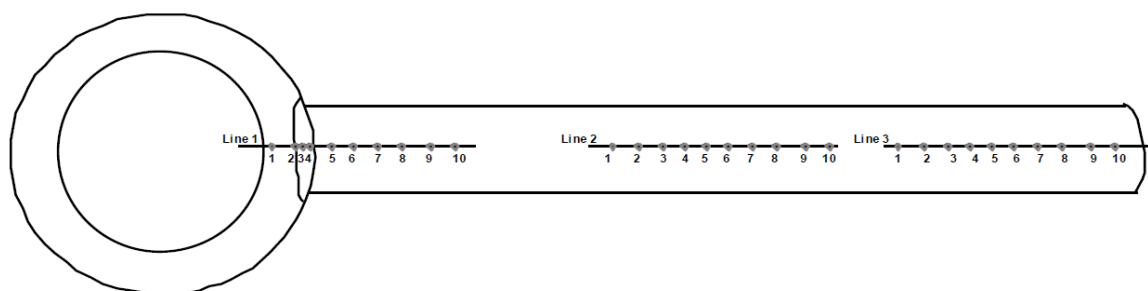


Figura 22. Distribución de las líneas de durezas HV1.

Tabla 5. Resultados de dureza Vickers HV1.

Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Línea 1	194	183	190	189	205	208	221	217	236	229
Línea 2	213	214	204	196	212	208	200	223	210	205
Línea 3	174	222	214	214	211	107	171	215	203	214

Según las especificaciones del consumible UTP 6222 Mo3, las durezas deben estar comprendidas entre 175-240 HV1. En las líneas 1 y 2, los valores obtenidos están comprendidos en ese rango. La línea 3, presenta valores más bajos, debido a la mayor acumulación de calor, en la que las velocidades de enfriamiento son más lentas, y se produce un ablandamiento del material.

3.1.2.1.6 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción de un material consiste en someter a una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Este ensayo se mide la resistencia a tracción del material, el límite elástico, el alargamiento porcentual de rotura y la elongación.

Para la realización del ensayo de tracción se tomó en cuenta lo especificado en la norma UNE-EN ISO 6892-1:2007.

El ensayo de tracción fue realizado a dos probetas, una en la dirección horizontal y otra en la dirección vertical (Véase Figura 25) en una Máquina Universal de Ensayos Mecánicos eléctrica. Las probetas adecuadas para este espesor son de 5 mm de diámetro y una longitud inicial entre puntos de 25 mm.

Los resultados obtenidos, se expresan en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados del ensayo de tracción.

	Límite elástico (MPa)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Elongación (%)	Alargamiento porcentual de rotura (%)
Horizontal	390	695	49	53.5
Vertical	346	648	55	58

Comparamos los resultados obtenidos con los especificados del material (Ver Tabla 7).

Tabla 7. Propiedades especificadas del material UTP 6222 Mo3.

Límite elástico (MPa)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Elongación (%)	Alargamiento porcentual de rotura (%)
414-758	827-1103	60-30	60-40

Se puede ver que las propiedades obtenidas en la dirección longitudinal son superiores a la dirección vertical. Los valores cumplen en todos los casos, excepto en límite elástico que presenta valores sensiblemente inferiores.

3.1.2.1.7 Ensayos de impacto

Las pruebas de impacto se utilizan para estudiar la tenacidad de un material.

Los ensayos de impacto fueron realizados a -196°C sumergidas en nitrógeno líquido y según EN-ISO 148-1.



Figura 23. Máquina de ensayo de impacto.



Figura 24. Probetas sumergidas en el baño a -196°C

Las probetas fueron mecanizadas de acuerdo a dicha norma con entalla en V2 (Véase Figura 25).

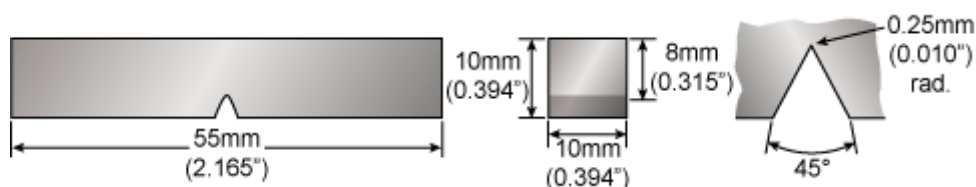


Figura 25. Dimensiones de las probetas de ensayo.

La máquina que se muestra en la Figura 23, es la máquina charpy, este ensayo consiste en colocar una probeta con las dimensiones especificadas en la Figura 25, de manera que quede simplemente apoyada y golpearla con un péndulo desde una determinada altura. La máquina Charpy está acoplada a un ordenador, dónde es posible registrar las curvas fuerza-tiempo, para obtener la energía absorbida durante el ensayo.

Se extrajeron dos juegos de probetas (véase Figura 15):

- Un juego (de 3 probetas cada uno) ha sido extraído a 2mm de profundidad con respecto a la cara superior, con la entalla en la dirección perpendicular a la dirección de soldadura.
- Otro juego ha sido extraído, vertical con la entalla en la dirección perpendicular de soldadura.

Los resultados de energía absorbida se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de impacto a -196°C.

	1	2	3	Media
Vertical	218	205	226	216
Horizontal	171	177	171	173

Los datos obtenidos en el juego vertical, presenta un valor medio mayor que el juego horizontal, pero en ambos casos, se obtienen valores muy superiores al especificado por el material a esa temperatura que es de 100 J.

3.2 VALORACIÓN DE LAS FORMAS DE ONDA E INPUTS TÉRMICOS (HITO 2)

En este hito se realizó el estudio para adquirir los parámetros eléctricos más relevantes del sistema (intensidad de corriente y voltaje) durante el proceso de soldeo GMAW pulsado, consiguiendo de esta manera un mayor control del proceso de soldeo y de la energía aportada durante su realización. Para ello se contaba con dos sensores de corriente, uno situado en el panel de control y el otro en la fuente de alimentación de la marca Fronius.

El sistema completo está formado por un robot de soldadura DX100 marca YASKAWA y una fuente de alimentación Fronius. El esquema principal se muestra en la Figura 26.

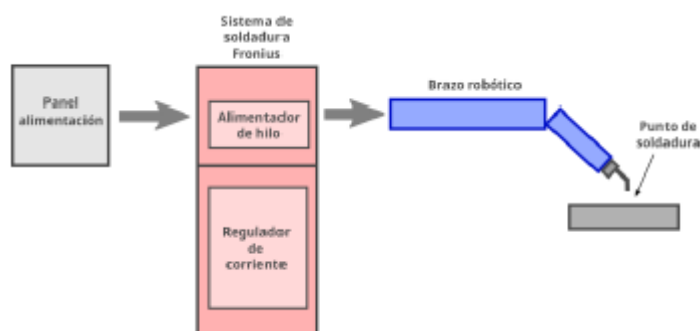


Figura 26. Esquema del sistema completo.

La corriente sale inicialmente del panel de alimentación a través de un cable que se junta con la fuente de alimentación de Fronius. De la fuente de alimentación sale el cable de corriente y el hilo del electrodo consumible hasta el brazo del robot de soldadura. En el tramo final del brazo del robot se encuentra la punta de contacto, que es donde se produce la transferencia de la corriente del cable al hilo del consumible, haciendo saltar el arco y cerrando el circuito eléctrico. La corriente vuelve por la pieza conectada a un cable de masa hasta la fuente de alimentación. En la Figura 27 se muestra el camino que sigue la corriente.

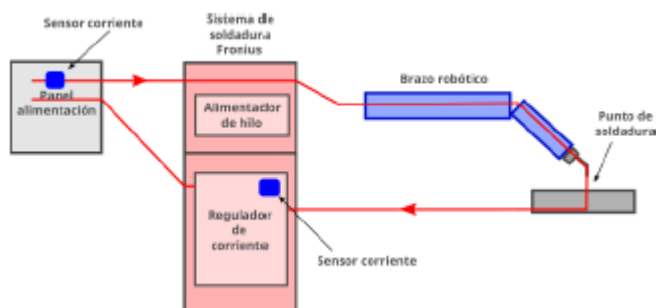


Figura 27. Esquema del circuito que sigue la corriente en el sistema.

Este sistema cuenta con dos sensores de corriente, uno situado en la fuente de alimentación y el otro en el panel de control.

En el sensor de corriente del panel de control se incluyó un adaptador propio en T para leer la salida del mismo con el hardware/software de adquisición de datos.

Con las pruebas reales llevadas a cabo en el proyecto fue llevado a cabo un estudio de los voltajes y corrientes características de los procesos de soldeo. Para ello se debe tener en cuenta que actualmente los procesos de soldeo trabajan con altas intensidades de corriente y bajas tensiones. Generalmente, esto es debido a que las fuentes de alimentación están constituidas por transformadores y rectificadores.

El objetivo de los transformadores en las fuentes de alimentación es la de tomar la corriente de la red eléctrica de baja intensidad y alto voltaje, y transformarla en una corriente apta para el soldeo, de alta intensidad y bajo voltaje. Esto se consigue mediante el uso de bobinas sobre un núcleo de hierro, de manera que el flujo magnético variable creado por la corriente que circula por una bobina, induce una corriente en otra bobina conectada a otro circuito (Ley de Faraday de inducción). De esta manera se pueden conseguir tensiones de hasta 40 V e intensidades de hasta 1500 A, según el proceso de soldeo a aplicar.

En la figura siguiente se puede ver el esquema general de un transformador eléctrico.

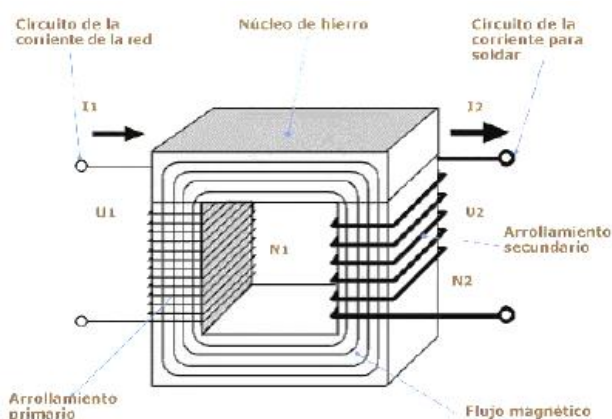


Figura 28. Esquema de un transformador eléctrico usado en fuentes de alimentación de soldeo.

Por otro lado, la mayoría de las fuentes de alimentación tienen un puente rectificador a la salida del transformador para transformar la corriente, ya sea alterna trifásica o monofásica, en continua. A partir de esta, en las fuentes de alimentación más modernas se puede volver a transformar esta

corriente continua en alterna de onda cuadrada, la cual es más apta que la alterna sinusoidal para aplicaciones de soldado.

Para la adquisición de datos en el proceso fue necesario diseñar dos tipos de hardware, uno para la medida de valores positivos y otro capaz de medir también valores negativos. Resultó necesario desarrollar este último para monitorizar los procesos de soldado en los que la corriente puede variar la polaridad.

Los dos hardware están formados por tarjetas Raspberry Pi, ya que son muy versátiles y tienen varias posibilidades de funcionamiento y configuración. La adquisición de datos se realiza utilizando un convertidor analógico-digital (ADC). Tras un estudio preliminar de varios modelos, se seleccionó el chip MCP3008 para el caso de que los datos a leer sean solo positivos y la tarjeta de expansión de la Raspberry Pi High Precisión AD/DA (Convertidor analógico-digital/digital-analógico de alta precisión) en el caso de datos positivos y negativos. Posteriormente se optó por utilizar únicamente la tarjeta de expansión para la adquisición de todos los valores, al tratarse de una solución mucho más completa, capaz de medir señales positivas y negativas y evitar de ese modo problemas de sincronización. Con esta solución la medición de la corriente y del voltaje se hace desde un único dispositivo.



Figura 29. Imagen de una de las tarjetas Raspberry Pi utilizadas.

En el primer caso, denominado “No diferencial” (medición de valores solo positivos), se utilizó un chip MCP3008 como convertidor analógico-digital acoplado a una protoboard (placa de pruebas) donde se implementó el circuito. En el circuito fue necesario introducir dos resistencias para realizar un divisor de tensiones, de esta manera se consiguió que la tensión que le llegase al MCP3008 no fuera superior a 5 V y evitar que se quemase el chip. En la figura siguiente se muestra un esquema del circuito diseñado.

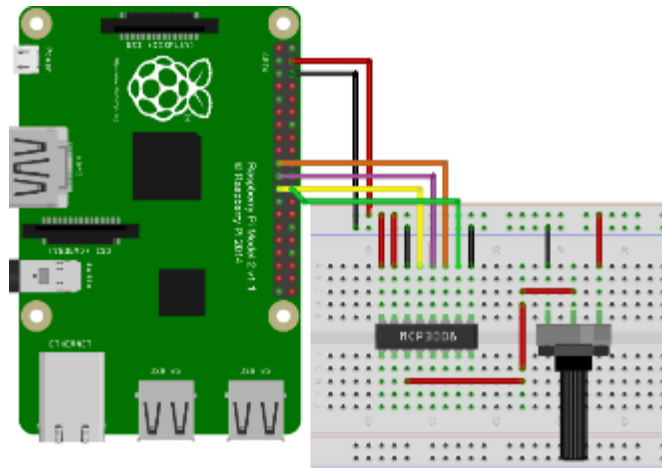


Figura 30. Esquema de conexión entre la Raspberry Pi y el chip MCP3008 montado sobre una protoboard.

Para las pruebas preliminares se añadió un potenciómetro para comprobar que los valores leídos variaban entre 0 y 5 V. Con esta configuración solamente se pueden adquirir datos de tensión y corriente de polaridad positiva.

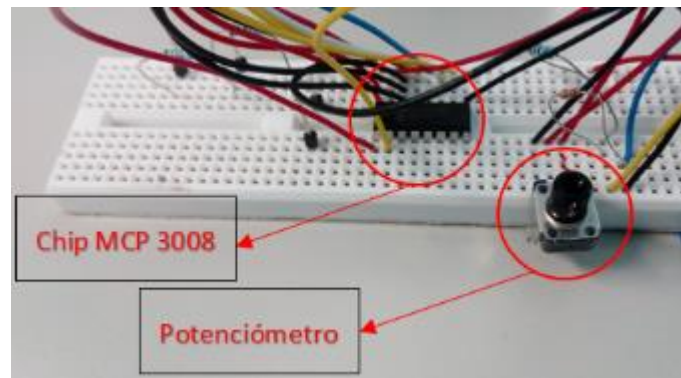


Figura 31. Circuito con chip MCP 3008 junto con el potenciómetro.

En el segundo caso, el denominado “Diferencial” (medición de valores positivos y negativos), se utilizó una expansión de la Raspberry Pi, conocido como High Precision AD/DA, acoplada directamente a la Raspberry Pi. A diferencia del caso anterior, este hardware permite la lectura de voltajes y corrientes de polaridad positiva y negativa.



Figura 32. Expansión High Precision AD/DA de la Raspberry Pi.

En lo que respecta a los software diseñados para la adquisición de datos, estos se realizaron utilizando el sistema operativo Linux. Fue necesario diseñar distintos softwares de adquisición de datos dependiendo del hardware usado, diferencial o no diferencial.

Es necesario destacar que el sensor de corriente del panel de alimentación tiene un rango de medición de ± 4 V, al cual le corresponden ± 1000 A, según la hoja técnica del sensor de corriente HAT 1000-S.

Electrical data			
Type	Primary nominal rms current I_{PN} (A)	Primary current, measuring range ¹⁾ I_{PM} (A)	RoHS since date code
HAT 200-S	200	± 600	47143
HAT 400-S	400	± 1200	46115
HAT 500-S	500	± 1500	46129
HAT 600-S	600	± 1800	46115
HAT 800-S	800	± 2400	46115
HAT 1000-S	1000	± 2500	46097
HAT 1200-S	1200	± 2500	77271
HAT 1500-S	1500	± 2500	46158

Figura 33. Hoja técnica del sensor de corriente HAT 1000-S.

Para la medida de los valores en el caso “No diferencial” se desarrolló un software basado en el lenguaje de programación Python

```

pi@raspberrypi:~/ADC_ADDITIVE_WELDING
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
('Lectura ADC:', 726)
Voltaje: 3.55V
-----
('Lectura ADC:', 736)
Voltaje: 3.6V
-----
('Lectura ADC:', 761)
Voltaje: 3.72V
-----
('Lectura ADC:', 768)
Voltaje: 3.75V
-----
('Lectura ADC:', 769)
Voltaje: 3.76V
-----
('Lectura ADC:', 772)
Voltaje: 3.77V
-----
('Lectura ADC:', 776)
Voltaje: 3.79V
-----
('Lectura ADC:', 778)
Voltaje: 3.8V

```

Figura 34. Lectura de los valores de voltaje correspondientes a las corrientes de soldeo con el software de corrientes “No diferencial”.

```

pi@raspberrypi: ~/ADC_ADDITIVE_WELDING
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
0.0
24.36
2
0.0
1 2
0.0
24.36
1
2
24.32
0.0
1
24.32
1
2
24.32
1
0.0
24.36
2
1
0.0

```

Figura 35. Lectura de los valores de voltaje de soldeo con el software de voltajes “No diferencial”. El software mencionado anteriormente genera un archivo de registro de los datos leídos hasta que se cancele la lectura de datos.

En el caso del hardware “Diferencial” se ha utilizado el lenguaje de programación C para realizar el software. En este caso solo se programó el software para la lectura de corrientes.

```

pi@raspberrypi: ~/ADC_ADDITIVE_WELDING/High-Precision-AD-DA-Board-Code/Rasp...
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
: not foundest.c: 1: ./ads1256_test.c: /*
./ads1256_test.c: 2: ./ads1256_test.c: Makefile: not found
./ads1256_test.c: 3: ./ads1256_test.c: Makefile: not found
./ads1256_test.c: 4: ./ads1256_test.c: Makefile: not found
: not foundest.c: 5: ./ads1256_test.c: *
: not foundest.c: 6: ./ads1256_test.c: */
: not foundest.c: 7: ./ads1256_test.c:
: not foundest.c: 8: ./ads1256_test.c: /*
./ads1256_test.c: 9: ./ads1256_test.c: define: not found
./ads1256_test.c: 10: ./ads1256_test.c: Syntax error: '|' unexpected
pi@raspberrypi:~/ADC_ADDITIVE_WELDING/High-Precision-AD-DA-Board-Code/Raspberry/
ADS1256 $ sudo ./ads1256_test
ID=
Ok, ADS1256 Chip ID = 0x3
0=7CB01D, 8174877 ( 4.895 135 V)
1=092FFC, 602108 ( 0.368 543 V)
2=1E437F, 1983359 ( 1.187 640 V)
3=1E426E, 1983886 ( 1.187 476 V)
4=1E43CB, 1983435 ( 1.187 885 V)
5=1E42AE, 1983150 ( 1.187 514 V)
6=1E4372, 1983346 ( 1.187 632 V)
7=1E429D, 1983133 ( 1.187 504 V)

```

Figura 36. Lectura de los valores de voltaje correspondientes a las corrientes de soldeo con el software “Diferencial”.

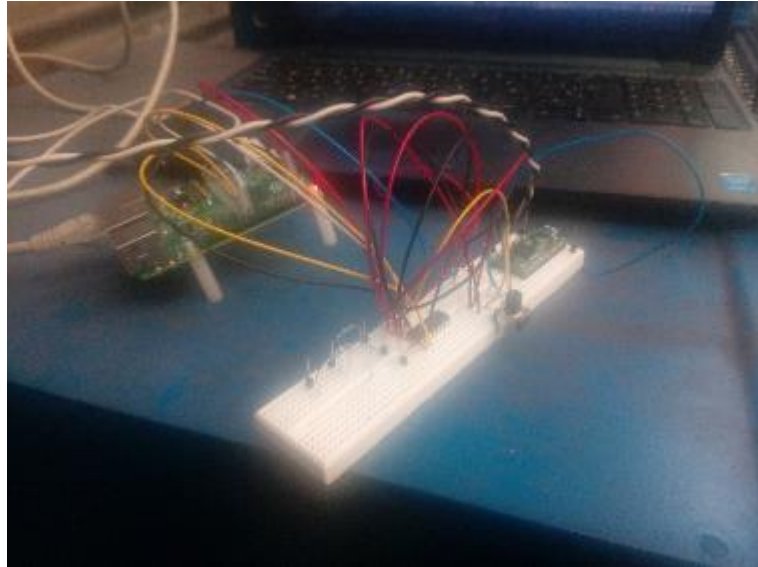


Figura 37. Hardware “No diferencial” acoplado al sensor del panel de alimentación.



Figura 38. Hardware “Diferencial” acoplado al sensor del panel de alimentación.

Finalmente, las lecturas obtenidas al realizar soldaduras con el robot de soldadura se muestran a continuación.



Figura 39. Imagen de los datos leídos durante las pruebas con el hardware “no diferencial”.

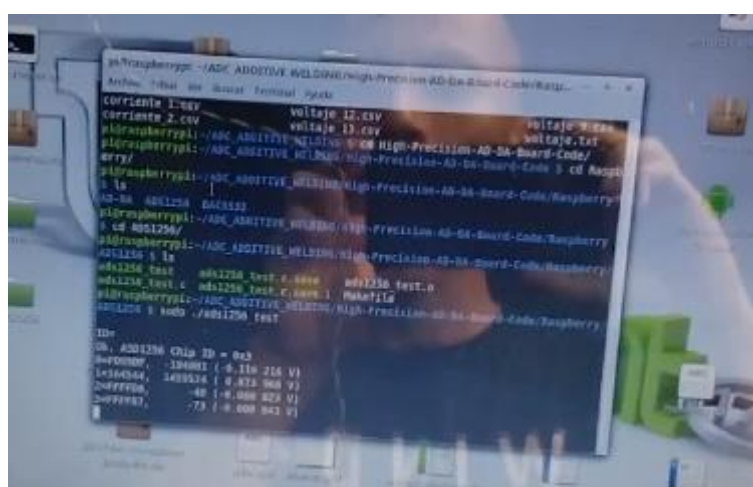


Figura 40. Imagen de los datos leídos durante las pruebas con el hardware “diferencial”.

3.2.1 Adquisición independiente de las formas de onda de tensión y corriente

Con el fin de determinar de forma precisa el input térmico real en el proceso de soldadura a partir de las formas de onda de tensión y corriente, se requiere llevar a cabo un muestreo en tiempo real y simultáneo de ambas magnitudes. Para facilitar la sincronización en las medidas, se ha decidido emplear el mismo sistema de adquisición en los dos casos, simplificando en gran medida el desarrollo hardware y software necesario. Para ello se parte del módulo de expansión de la Raspberry Pi High Precisión AD/DA mencionado anteriormente (caso “Diferencial”).

De todos los convertidores AD evaluados, es el más completo y el que mejor se adapta a los requerimientos del proyecto:

- El módulo analógico-digital consta del integrado convertidor ADS1256, que dispone de hasta 8 canales de entrada (4 en caso de medida diferencial). Tal y como se ha comentado anteriormente, existen procesos de soldeo en los que se puede llegar a invertir la polaridad de la corriente inyectada, por lo que se configuró el sistema para tomar medidas diferenciales de ambas magnitudes (tensión y corriente) en 2 canales consecutivos. El rango de entrada de todos los canales es de ± 5 V.

- Según las especificaciones técnicas definidas para el sistema durante la anualidad 2016, la frecuencia de muestreo para la adquisición de datos deber ser mayor que 2000 muestras/segundo, con el objetivo de obtener datos suficientes para reconstruir las señales analógicas de forma fiable sin colapsar el bus de datos. En este caso el conversor es capaz de llegar a velocidades de muestreo de hasta 30000 muestras/segundo.

Otra de las especificaciones de partida es la precisión mínima de 10 bits. Dicho requisito se cumple de nuevo sobradamente, ya que el integrado dispone de 24 bits de resolución (2^{24} niveles de cuantificación).

3.2.1.1 Medida de la forma de onda de corriente

Se procedió a extraer las medidas de corriente del sensor HAT 1000-S situado en el panel de alimentación del sistema, aprovechando la conexión en T ya instalada durante la anualidad anterior.

El sensor de corriente tiene un rango de salida de ± 4 V (correspondiente a los valores de corriente de ± 1000 A), por lo que no se necesitó implementar ningún tipo de adaptación hardware. A nivel de software sí que se adaptaron los niveles de tensión a su equivalente en amperios, con el fin de realizar el almacenamiento de los datos en las magnitudes adecuadas.

El muestreo de la señal de corriente se realizó a través del canal diferencial 0, correspondiente a las entradas AD0 y AD1 del módulo de expansión.

3.2.1.2 Medida de la forma de onda de tensión

La tensión implicada en el cálculo del input térmico es la que produce el arco que genera la soldadura, es decir, la que existe entre la punta de contacto y la propia pieza conectada a masa. El procedimiento implantado determina que el contacto de medida referido a la punta de la pistola ha de posicionarse lo más cerca posible del punto de soldadura, lo que supone un requisito exigente desde el punto de vista técnico.

Por una parte, hay cabezales de soldadura que, por su propia estructura interna, no permiten el acceso aislado a la punta de contacto, provocando la inevitable electrificación de toda la carcasa al intentar extraer un contacto de medida. Por otro lado, las elevadísimas temperaturas que se alcanzan en las cercanías de la punta de contacto en la mayoría de los procesos de soldadura imposibilitan el uso de cables convencionales, en los que las fundas de protección acabarían desintegradas y las medidas dejarían de ser fiables al cambiar sus propiedades físicas con tan altas temperaturas.

Para dar solución a dichas dificultades se decidió implementar el sistema en un cabezal de soldadura CMT, en el que no se alcanzan temperaturas tan elevadas. Se posicionó el cable de tal manera que entra en contacto con la punta de la boquilla y a la vez queda aislado eléctricamente de la carcasa por un núcleo interno de teflón. Como se puede ver en la Figura 41, se utiliza un cable de alta temperatura en la sección cercana al contacto, que es la que se ve más comprometida desde el punto de vista térmico.



Figura 41. Detalle del montaje del contacto de medida de tensión asociado a la punta del soldador. El contacto de medida referido a la pieza se conecta directamente a la mesa de soldadura, conectada a su vez a la pieza y a la masa del sistema (Figura 48).

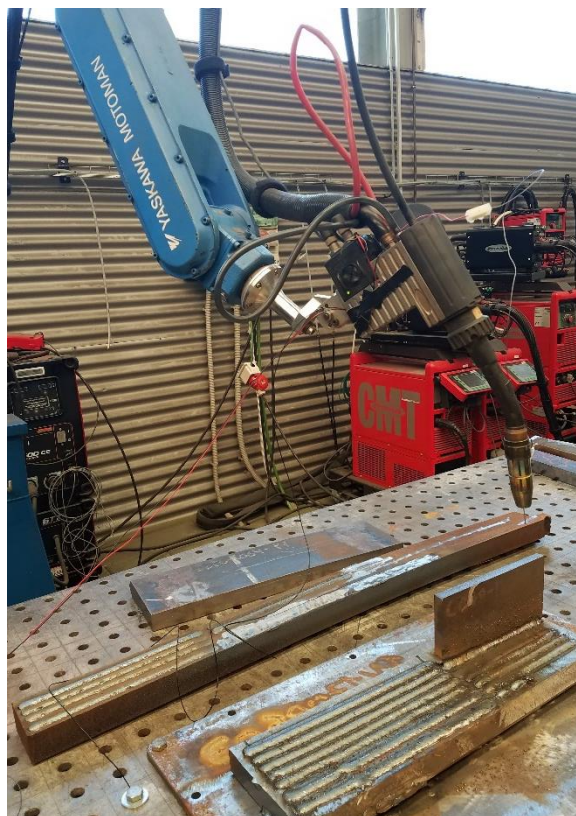


Figura 42. Montaje del sistema de medida de tensión entre la punta del soldador y la masa de la pieza

En el caso de la medida de tensión sí que resultó necesaria una adaptación hardware de la señal extraída de los contactos, ya que supera el rango máximo admisible en la entrada del convertor AD. Se diseñó y desarrolló un circuito divisor de tensión resistivo, tomando como referencia de tensión máxima la máxima salida del sistema de soldadura Fronius (90 V). Nuevamente se readaptaron los

niveles de tensión por software, devolviendo las medidas a los valores reales antes de su almacenamiento.

El muestreo de la señal de tensión se realizó a través del canal diferencial 1, correspondiente a las entradas AD2 y AD3 del módulo de expansión.

3.2.2 Almacenamiento de la información

Los valores resultantes del muestreo de las señales de tensión y corriente han de almacenarse numéricamente en ficheros para su procesamiento o visualización en tiempo real o, en su caso, post-procesamiento de cara al cálculo del input térmico. El formato que mejor se adecúa es el de los archivos .csv por su facilidad de manejo y directa incorporación a diferentes programas de cálculo y visualización, como por ejemplo Matlab o Excel.

Como se puede ver en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se decidió establecer un formato lo más sencillo posible para evitar acumular información innecesaria que hiciese más pesados los archivos de información. Cada archivo está compuesto por 3 columnas, correspondientes a las 3 magnitudes involucradas en el proceso: las 2 medidas (tensión en voltios y corriente en amperios) y 1 adicional de referencia (una marca de tiempo, medida en microsegundos a partir del inicio de los muestreos). Al inicio de cada archivo se incluye una línea de cabecera que identifica el contenido de cada columna.

Timestamp (us)	Tensión (V)	Corriente (A)
0	30.200	284.630
501	30.200	284.630
849	30.200	284.630
1179	30.200	293.536
1508	30.031	293.536
1839	30.031	293.536
2168	30.031	293.536
2497	30.031	292.877
2826	29.911	292.877
3155	29.911	292.877
3484	29.911	292.877
3814	29.911	277.123
4143	30.389	277.123
4473	30.389	277.123
4804	30.389	277.123
5132	30.389	276.688
5462	31.177	276.688
5790	31.177	276.688
6119	31.177	276.688
6449	31.177	272.694
6778	28.845	272.694
7108	28.845	272.694
7437	28.845	272.694
7766	28.845	270.805
8095	29.698	270.805
8425	29.698	270.805
8753	29.698	270.805
9083	29.698	266.126
9412	30.310	266.126
9742	30.310	266.126
10071	30.310	266.126
10423	30.310	275.150
10761	29.271	275.150
11095	29.271	275.150

Figura 43. Ejemplo de archivo .csv resultante, incluyendo los valores de tensión y corriente adquiridos

Los datos se van almacenando teniendo en cuenta la fecha y hora reales en la que se realizan los muestreos. Cada minuto se agrupan todas las medidas en un mismo archivo. Si se toma como referencia una frecuencia de 2000 muestras/segundo, cada archivo contendría como máximo 120000 filas. A su vez, todos los archivos generados cada hora se agrupan en una única carpeta, identificada por su fecha y hora correspondiente.

La tarjeta *Raspberry Pi* no incorpora ningún reloj en tiempo real, por lo que para mantener la hora actualizada es preciso tener conexión a Internet. Se llevó a cabo, por tanto, la configuración tanto del módulo Ethernet como del módulo WiFi para su conexión a Internet a través de la red propia de Fundación ITMA y sus distintas puertas de enlace.

Por último, se configuró asimismo una entrada digital de cara a incluir en un futuro una señal de activación que marque el inicio y fin del proceso de muestreo. De esta manera se podría controlar toda la adquisición desde un ordenador central o desde el propio sistema de soldadura.

3.2.3 Resultados en entorno real

Una vez desarrollado el sistema preliminar completo, se llevaron a cabo una serie de pruebas en un entorno real, con el fin de valorar objetivamente los resultados obtenidos y sus posibilidades de aplicación.

En primer lugar se realizó una evaluación inicial del sistema de adquisición de datos, tomando como entradas señales de tensión controladas por una fuente de alimentación regulable. Estos ensayos, de los que se puede ver un ejemplo en la Figura 44, sirvieron de validación básica de los valores muestreados por el sistema y su precisión.

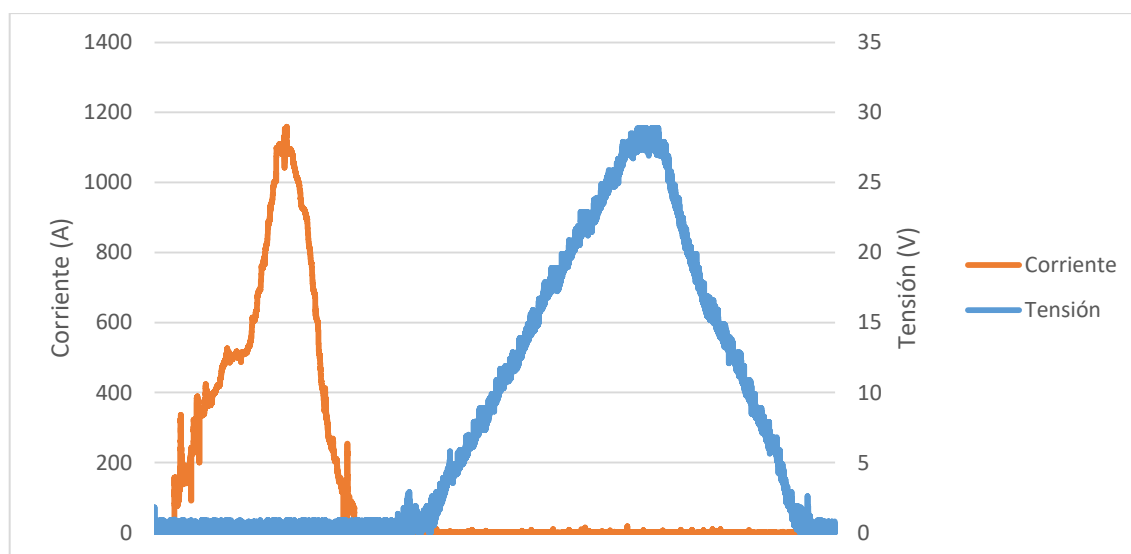


Figura 44. Gráfica extraída a partir de los valores de tensión y corriente adquiridos en una prueba de validación

A continuación se procedió a integrar el sistema sobre uno de los conjuntos de soldadura de pulsado GMAW existente en Fundación ITMA, como se puede comprobar en la Figura 46. Tal y como se ha explicado anteriormente, la tensión fue muestreada directamente entre la punta del soldador y la masa de la pieza y la corriente se midió a partir de la salida del sensor situado en el panel de alimentación del sistema.



Figura 45. Montaje del sistema de adquisición de datos de corriente (izquierda) y tensión (derecha)

A partir de los archivos .csv generados, se pudo realizar una evaluación de los datos numéricos resultantes con respecto a los valores aproximados que se aplicaron en cada caso, obteniendo una gran precisión en todos los tipos de soldadura empleados. El formato de salida seleccionado también permitió llevar a cabo fácilmente una valoración básica de la utilidad de estos datos de cara a su posible post-procesado o visualización (Figura 46).

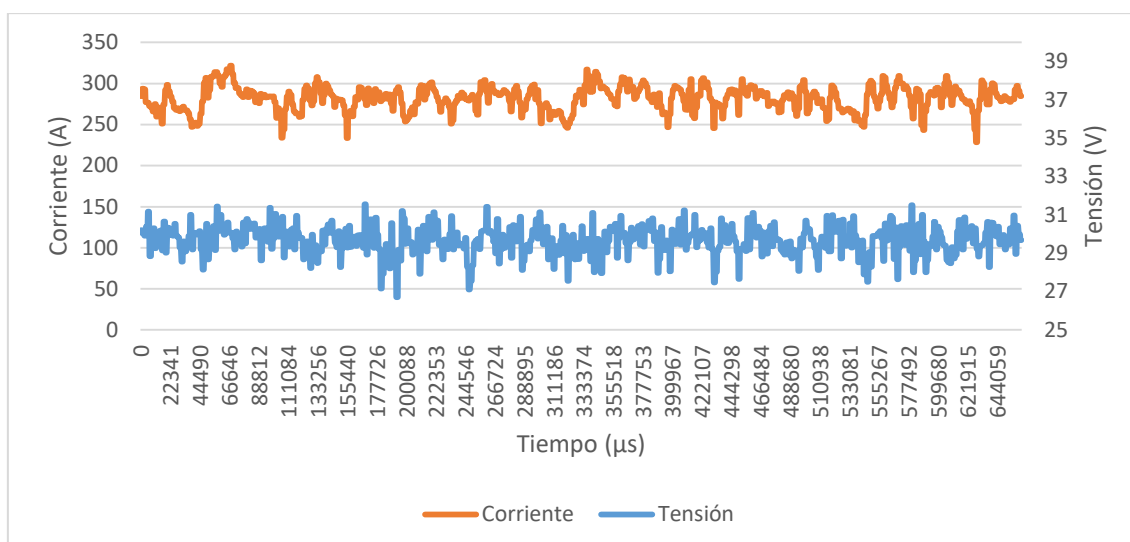


Figura 46. Gráfica ejemplo de un proceso de soldadura real

3.3 SISTEMAS DE DETECCIÓN DE JUNTA ON-LINE (HITO 3)

En este hito se ha llevado a cabo la selección del tipo de sensor y tecnología más adecuada para la fabricación aditiva mediante soldadura por arco, así como su modificación y adecuación para poder acoplarlo al robot de la celda de soldadura (T.3.1). El objetivo es conseguir la integración de sistemas de detección de junta on-line que permitan mayor precisión en el posicionamiento del baño de soldadura durante la fabricación de piezas por esta tecnología.

3.3.1 Estudio y selección de sistema de detección de junta on-line. Integración.

a) META VISION SYSTEMS-SERIE SLS

Los sensores serie SLS de la compañía META VISION SYSTEMS, son una nueva generación de seguidores de junta láser utilizados en gran variedad de aplicaciones de control y automatización de soldadura.



Figura 47. Sistema de seguimiento de junta SERIE SLS

Este sensor utiliza tecnología de triangulación láser para generar perfiles 3D del área de soldadura, que son analizados por el sistema de control. El sensor se comunica con la celda de soldadura a través de un circuito integrado que proporciona al sensor de una interfaz con protecciones y fuentes de alimentación. Dichas comunicación se realiza a través de cable de red.

La monitorización y diagnóstico de los datos se realiza a través de un computador conectado a través del cable de red.

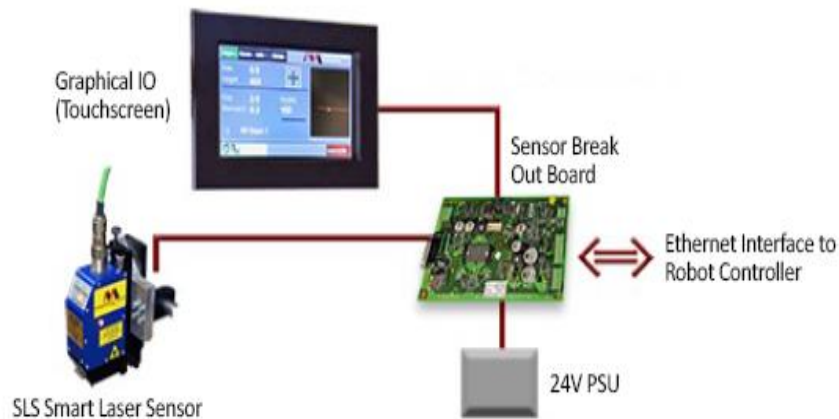


Figura 48. Esquema de comunicaciones de los sensores serie SLS.

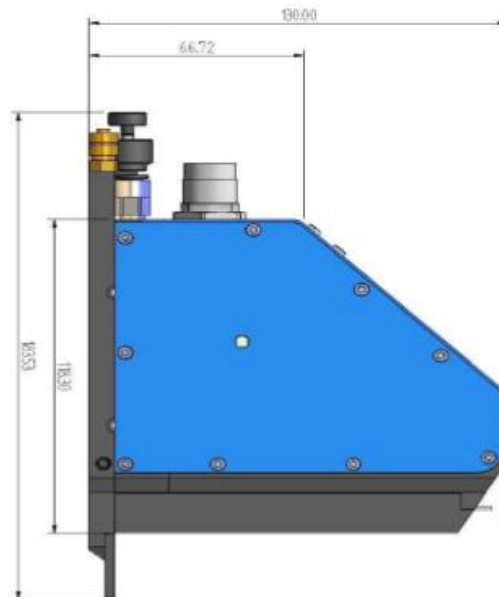


Figura 49. Dimensiones de los sensores serie SLS.

La serie SLS proporciona una buena solución para pasadas de raíz o juntas de una sola pasada, ya que su diseño permite únicamente el control de los bordes de junta y no permite realizar el seguimiento sobre un cordón en procedimientos multipasada.

Estos sensores se proporcionan con un software adaptado a cada caso particular, por lo que la flexibilidad en cuanto a tipos de juntas y procesos se ve afectada. El coste aproximado del sistema completo es de unos 20000€.

b) META VISION SYSTEMS-SERIE DLS

Los procedimientos de soldadura multipasada requieren para su seguimiento y control adecuados del uso de sistemas de seguimiento de junta más avanzados, como la serie DLS de META VISION SYSTEMS (Figura 50)



Figura 50. Seguimiento de junta serie DLS

Los sistemas serie DLS generan perfiles detallados de cordón de soldadura, en tanto a sus dimensiones y morfología. Por tanto, es posible su aplicación para técnicas multipasada, al no basar el seguimiento en el análisis de las aristas de la junta.

El sensor DLS detecta la intersección del cordón de soldadura previo con la pared de la junta, y aplicando un 'offset' preestablecido realiza los cálculos para ajustar la trayectoria de soldeo.

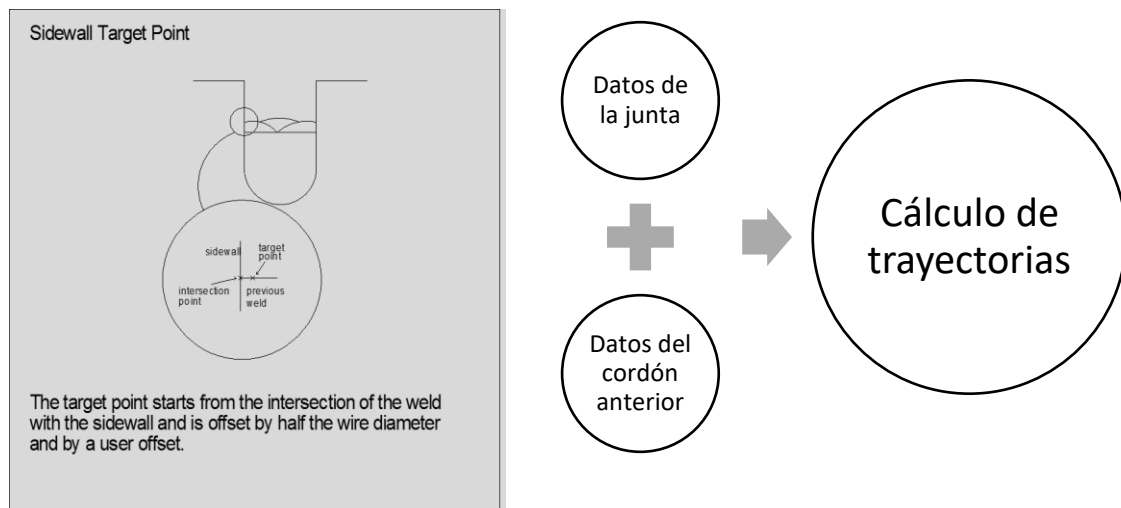


Figura 51. Esquema de tecnología multipasada del sensor DLS.

El control del proceso por parte del operador se realiza a través de PC mediante el software que se muestra en la siguiente imagen:

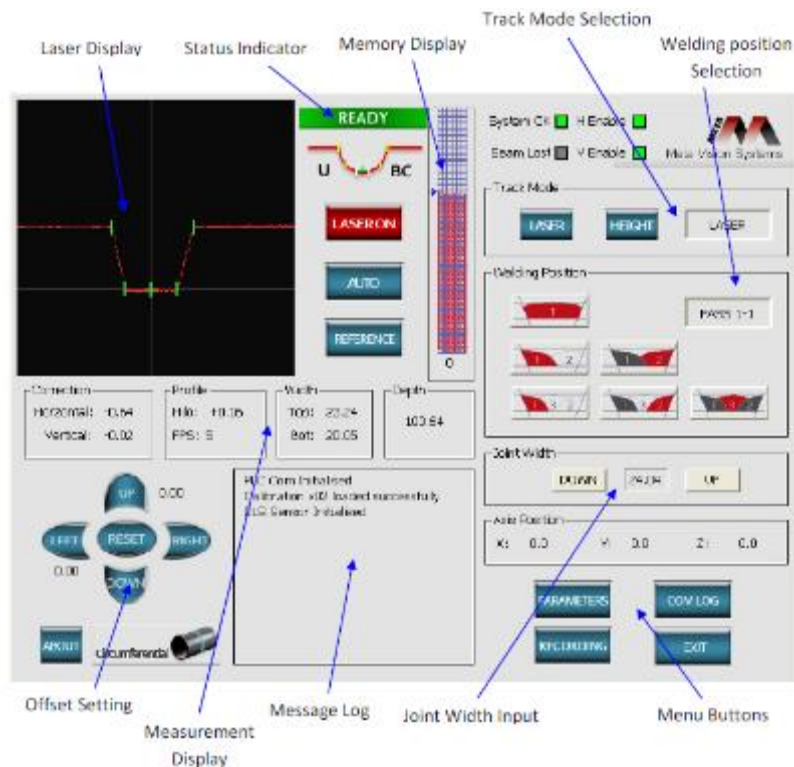


Figura 52. Software de control del sistema de seguimiento de junta DLS.

El software muestra el perfil laser de la junta, en donde el operador elige manualmente el tipo de junta y sus puntos de referencia (bordes superiores, inferiores y centro). A continuación, se ha de elegir, para cada fase del proceso la estrategia de soldadura con el objeto de que el sensor, a partir de los puntos de referencia posicione el cabezal de soldadura e inicie el proceso. De esta manera, los eventuales cambios en la geometría del cordón serán detectados por el sistema, y mediante los sistemas de comunicación se corregirán las trayectorias.

Las comunicaciones con la computadora de control (generalmente un PC industrial) se realizan vía cable de red de manera que los datos son transmitidos sin interferencias.

Otra característica diferenciadora de este sistema es su capacidad para el análisis de juntas muy profundas con paredes de gran inclinación y reflectantes, donde el sensor tipo SLS no es capaz de realizar mediciones adecuadas.

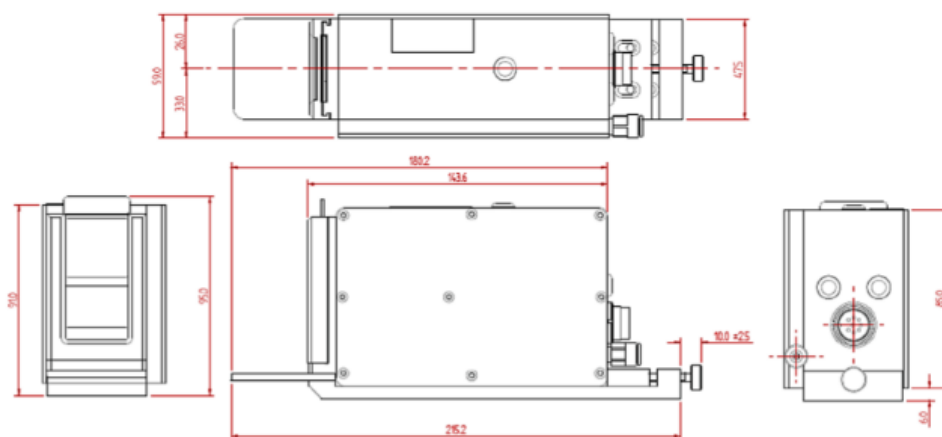


Figura 53. Dimensiones del sensor serie DLS.

Los sistemas DLS son proporcionados junto con el software VistaWeld system, que el proveedor adapta a los tipos de juntas y procedimientos del cliente, por lo que la flexibilidad en este sentido es un inconveniente.

El coste del sistema completo se estima en torno a los 30000€.

c) SCANSONIC TH6D

El sensor TH6D de Scansonic está diseñado para el seguimiento óptico de procesos de soldadura automatizados, tanto por arco como soldadura laser. El sensor también está diseñado para su aplicación en otros procesos por su gran flexibilidad.



Figura 54. Sistema de seguimiento de junta TH6D de Scansonic.

El sistema TH6D utiliza múltiples líneas laser durante la ejecución de mediciones del cordón y junta de soldadura, tomando como variables clave la posición actual del cordón, dimensiones de la junta y el offset del borde de la junta, así como la posición de la antorcha, de manera que una vez procesada, la información pueda ser transmitida al controlador del robot.

El seguimiento de junta TH6D presenta las siguientes características básicas:

- Seguimiento de junta y cordón para las juntas más comunes.
- Aplicable en materiales reflectantes como aceros inoxidable y aluminio.
- No se ve afectado por la presencia de campos eléctricos o luz ambiental.
- Accesibilidad hasta profundidades de 150 mm.
- Refrigeración por aire y protecciones integradas para permitir su uso en ambientes agresivos.

d) ServoRobot POWER-TRAC

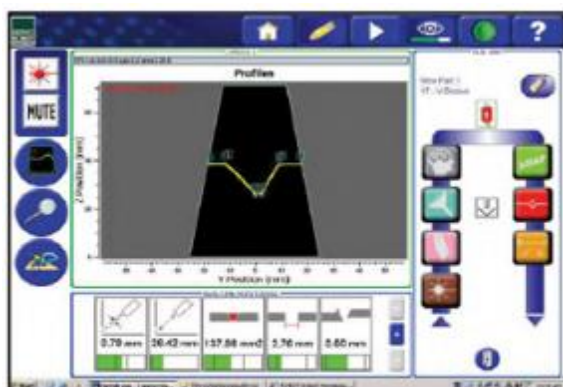
ServoRobot ofrece, con su sistema Power-Trac, un sistema estándar totalmente integrado con sensor laser, unidad de control y software adaptado a las necesidades específicas de cada junta.



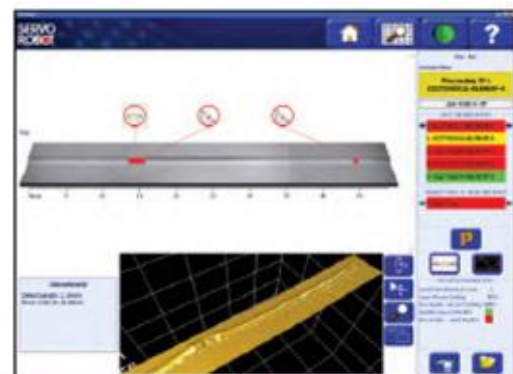
Figura 55. Sistema de seguimiento de junta Power-Trac de ServoRobot.

El sistema Power-Trac presenta las siguientes características generales:

- Control de las trayectorias de soldadura en tiempo real.
- Inmune a los procesos relacionados con el ambiente de soldadura (salpicaduras, alta temperatura, humos, campos magnéticos, golpes y vibraciones).
- No se ve afectado por los cambios en la luz ambiental.
- Puede realizar seguimiento en todo tipo de materiales.
- Realiza la medición de la geometría del cordón y de la junta.
- El software posee una librería de cordones integrada que permite localizar, medir y realizar el seguimiento de los cordones más típicos.
- Laser de alta velocidad que permite el reconocimiento rápido y eficaz de la junta.
- Reconocimiento automático de junta.



Seguimiento de la junta



Reconstrucción 3D del cordón

Figura 56. Software para el seguimiento de junta (izda) y para la reconstrucción 3D del cordón (dcha) del sistema Power-Trac.

El sistema realiza las comunicaciones software-hardware bien vía cable de red, o por sistema inalámbrico, lo cual permite mucha flexibilidad.

En cuanto al software, como en otros casos, el propio fabricante se encarga de su adaptación a las necesidades específicas del cliente; no obstante, se presenta como una solución adaptable y flexible a los distintos tipos posibles de junta que se puedan presentar en cualquier proceso.

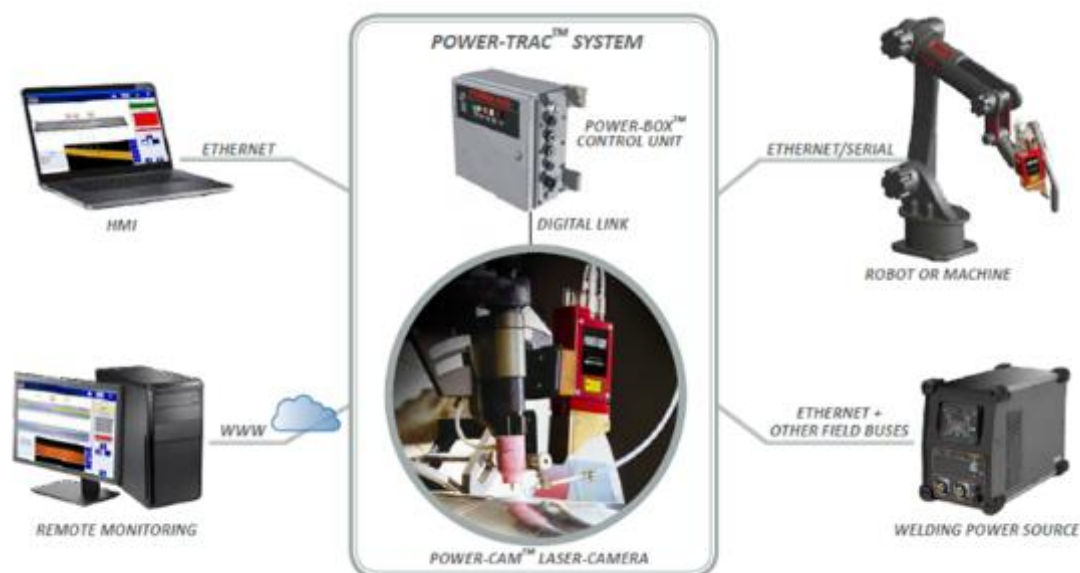


Figura 57. Posibilidades de comunicaciones para el sistema Power-Trac.

e) Sensor ComArc de Yaskawa

El sensor ComArc de Yaskawa, está diseñado para el seguimiento de juntas de soldadura automatizadas, mediante arco. El sensor está específicamente diseñado para soldar chapas a tope en T y a solape. Para velocidades de soldadura inferiores a 1m/min.

El sensor se basa en soldadura con una fuente de voltaje constante, la corriente varía con la distancia del electrodo al metal base, por lo que el sensor monitoriza la corriente para mantener la corriente estable, corrigiendo así las posibles desviaciones de la pieza.

Durante la soldadura, la antorcha se desplaza de lado a lado, si la distancia del electrodo al metal base es la misma, la corriente es la misma a ambos lados de la junta. En caso opuesto, el sensor corrige la trayectoria desplazando la antorcha hacia la junta.

	META VISION SLS	META VISION DLS	SERVO-ROBOT POWER-CAM/DUAL	SCANSONIC TH6d	ComArc
Apta para soldadura	SI	SI	SI	SI	SI
Localización Junta	SI	SI	SI	No	SI
Seguimiento Junta	SI	SI	SI	SI	SI

Inspección	SI	SI	SI	-	NO
Materiales reflectantes	SI	SI	-	SI	SI
Todos los tipos de junta	No	SI	SI	No	NO
Múltiples haces	-	-	-	SI	-
Precisión(mm)	0.4	0.3	-	-	0.15
Resolución de profundidad(mm)	0.22	0.15	0.06 a 0.6	0.12	-
Distancia de medida(mm)	165 a 350	130 a 300	140	150	-
Campo acción transversal(mm)	100 a 190	63 a 120	-	44	-
Profundidad de medida(mm)	190	150	-	80	-
Comentarios	Reflejos en juntas estrechas.	Sistema DLS para juntas estrechas y profundas	-	TH6D puede detectar juntas estrechas	-

En esta tarea se hizo una tabla comparativa con las características más importantes de los sistemas analizados y que su utilización fuese compatible con la fabricación aditiva.

Se realizó una tabla resumen con las características más importantes, y se seleccionó el ComArc porque era el único que no era sensor láser y que era más sencillo de manejar para la realización de pruebas y además las características son adecuadas para el estudio de las juntas de esta tarea.

El sistema seleccionado fue el comArc, el más sencillo de utilizar y el único que se carga directamente en el robot, sin necesidad de fabricar utillajes para adaptarlo a la antorcha de soldadura. Con las ventajas que ello conlleva, ya que el resto de sensores son sensibles a la temperatura y a las salpicaduras del propio proceso de soldeo o el peso y dimensiones que tan importantes son en la pistola de soldadura.

Para la integración del comArc sólo fue necesaria su instalación y activación en el sistema. Para la activación del mismo fue necesario la descarga del archivo "all.prm" (que contiene la parametrización de la celda) y su modificación para su posterior carga en la celda.

3.3.2 Pruebas de detección de junta y precisión en seguimiento de trayectoria (T.3.2)

La tecnología del ComArc permite ajustar en tiempo real la trayectoria del robot y también ajustes de tensión y de alimentación del alambre o velocidad de avance para controlar totalmente la soldadura.

Estas variables las corrige el robot, que realiza una primera pasada, en la que se ve si se hace correctamente el seguimiento de la junta. Pero durante la soldadura con la antorcha moviéndose hacia arriba y hacia abajo, el sensor de arco comprueba las corrientes de soldadura en ambos puntos, un punto superior y un punto inferior y corrige la trayectoria para igualar los valores.

Para comprobar el correcto funcionamiento del programa se realizaron dos bloques de pruebas:

En el primero de ellos, en el que se metía la trayectoria real al robot y posteriormente se movía la pieza para comprobar que el ComArc corrige la trayectoria teórica y sigue la trayectoria real.



Figura 58. Seguimiento de juntas ComArc prueba1.



Figura 59. Apariencia final de la prueba 1.

En la Figura 58, vemos que el robot está siguiendo la trayectoria real. Una vez que la pieza se ha movido y el robot se pone a soldar, corrige la trayectoria, por la modificada. Y como se puede ver en la Figura 59, el cordón no se ha desviado.

En el segundo bloque de pruebas lo que se hizo, es el caso contrario. En este caso se instala mal la trayectoria en el robot, y es ComArc el que detecta que los parámetros no son correctos y los corrige hasta la trayectoria real.

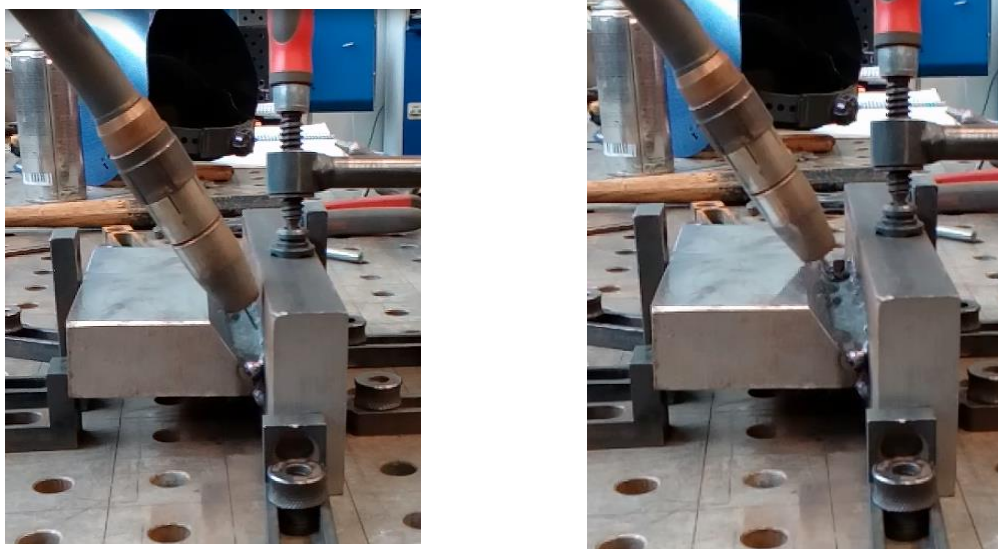


Figura 60. Prueba 2 del ComArc

En la imagen de la izquierda vemos que el robot empieza siguiendo la pared vertical, pero a medida que va avanzando, se acerca a la pared en bisel (imagen de la derecha), ya que la trayectoria como hemos dicho se ha cargado mal en el Robot para comprobar la precisión del sistema.



Figura 61. Apariencia final prueba 2.

En la Figura 61 podemos ver como el cordón una vez soldado, está en la pared vertical. Con estas pruebas podemos comprobar que el comArc corrige perfectamente la trayectoria de la junta de soldadura.

3.4 SISTEMAS DE CONTROL DE DEFECTOLOGÍA (HITO 4)

Este hito se centraba en cuatro puntos fundamentales: el estudio de diversas técnicas de control en línea sobre el baño de soldadura; la definición de los parámetros de soldadura que indiquen de forma sistemática en los defectos; la identificación de una serie de señales patrón para cada técnica

a estudiar y la correspondencia entre los límites normalizados de las indicaciones no aceptables por los códigos de fabricación y las señales patrón obtenidas por las distintas técnicas.

3.4.1 Definición de los parámetros de soldadura que inciden de forma sistemática en los defectos (T4.1)

La termografía activa es una técnica de inspección relacionada con los ensayos no destructivos (END o NDT de Non Destructive Testing) en la que intervienen las cámaras termográficas como instrumento de medición y una fuente de calor como excitación (parte activa). Las técnicas tradicionales de END, entre las que se encuentran la inspección por Radiología, Ultrasonidos, Corrientes Inducidas, Líquidos Penetrantes, etc., van dejando paso a técnicas novedosas como la Termografía Activa.

Las ventajas de la termografía son muy numerosas, pero la posibilidad de inspeccionar áreas de grandes dimensiones y el hecho de que sea una técnica sin contacto, destacan por encima de las demás.

El principio de funcionamiento es sencillo: se emplean cámaras termográficas para detectar heterogeneidades en la soldadura. Dichas heterogeneidades se ponen de manifiesto debido a los diferentes coeficientes de conductividad térmica y la manera en la que se disipa el calor aportado por la soldadura.

El objetivo de esta técnica es la detección en línea de heterogeneidades o discontinuidades para su posterior análisis y comparación con unos defectos límite.

La radiación por infrarrojos va más allá del espectro de radiación visible. Nuestros ojos reciben la luz radiada que se refleja en superficies o que se emiten desde determinadas fuentes y nuestro cerebro la interpreta. La radiación por infrarrojos es calor que irradia un material o que se refleja en el mismo; es una radiación que nuestros ojos no ven. Una cámara termográfica interpreta el calor radiado o reflejado por infrarrojos mediante la asignación de una graduación visible de colores o una escala de grises a un retrato radiado de la escena. La paleta de colores muestra los puntos calientes en blanco y de rojo-naranja-amarillo-verde-azul-añil-violeta a negro cuanto más fría es la temperatura. Esto nos permite ver una representación visual del espectro de infrarrojos que nuestros ojos no son capaces de ver. La cámara termográfica toma una "imagen" de la soldadura con temperaturas comparativas. Todos los materiales del mundo absorben, reflejan y transmiten radiación infrarroja en función de sus propiedades físicas.

La emisividad, llamada antiguamente emitancia, es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debido a su temperatura.

EMISSION VALUES OF COMMON MATERIALS*	
Material	Emissivity
Silver (polished)	0.01
Aluminum (unoxidized)	0.02
Gold (polished)	0.02
Aluminum (heavily oxidized)	0.20
Zinc (bright galvanized)	0.23
Steel (316 polished)	0.28
Soil (plowed field)	0.38
Iron (liquid)	0.43
Iron (rusted)	0.65
Water	0.67
Sand	0.76
Steel (cold rolled)	0.80
Wood (oak planed)	0.91
Brick (red, rough)	0.93
Carbon (Lampblack)	0.95
Ice	0.98

*Provided for illustrative purposes only.

Figura 62. Valores de emisividad de distintos materiales a una temperatura determinada

De la búsqueda bibliográfica inicial se concluyó que el material base, así como el consumible, debería de ser preferentemente un acero al carbono estructural (cold rolled) ya que en otros casos, como por ejemplo con aceros inoxidables (AISI316), las imágenes pueden ser menos precisas al tener una emisividad menor.

La inspección visual por termografía es una técnica cualitativa en vez de cuantitativa. Al visualizar una soldadura, por ejemplo, el interés reside en la diferencia de temperatura entre las distintas zonas del cordón. Al llevar nuestras capacidades de visión más allá del espectro visible hasta el espectro de calor radiado, empezamos a vislumbrar las cualidades de predicción que verdaderamente nos pronostican las probabilidades de defecto.

Existen diferentes formas de inducir defectos, ya que no son siempre la misma causa las que los generan. En esta tarea, se ha estudiado como se generan los defectos según la bibliografía del Módulo 1 de CESOL.

Los defectos estudiados en esta tarea son los siguientes que teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto es:

- *Cambios en la trayectoria de soldeo:*
Bastan con variar la trayectoria rectilínea del cordón.
- *Cambios en la geometría del cordón:*
Para que los cordones no sean uniformes, es suficiente cambiar la velocidad de ejecución, la intensidad o la velocidad de aporte del consumible, que son los que se han realizado.
- *Proyecciones:*
Para introducir estos defectos en el proceso GTAW se han introducido en la trayectoria de soldeo aceite y óxidos, produciendo una falta de limpieza del metal base y de esta manera conseguir que se puedan producir las proyecciones.
- *Porosidad:*
Para introducir porosidad en el proceso de soldeo basta con dejar la superficie a soldar que no esté adecuadamente limpia, por ejemplo, aceite, suciedad, pintura o grasa.
- *Inclusiones*

Las inclusiones son sólidos no metálicos atrapados en el metal de soldadura o entre el metal de soldadura y el metal base. En general, estas inclusiones resultan por fallos en la técnica de soldeo, en un diseño de la junta que no permita un acceso adecuado o una limpieza inadecuada entre los cordones de soldadura. La escoria que se produce en procesos de soldeo como el SAW, SMAW, FCAW etc, se puede quedar atrapada en muescas agudas en la interfase de metal base y metal de soldadura o entre los cordones de soldadura.

Para las pruebas de introducción de defectos de inclusiones de escoria con el proceso de soldeo GTAW, se añadió flux en la trayectoria de soldeo.

- *Entallas bajo el cordón de soldadura*

Se realizan entallas directamente en el cordón.

Se hicieron pruebas con varios procesos de soldadura, descartándose todos aquellos no continuos (GMAW pulsado, CMT, etc.) debido a que la aportación discontinua de calor al caldo de estos procesos daba imágenes discontinuas que se confundían con heterogeneidades de la soldadura (ver Figura 63 y Figura 64).

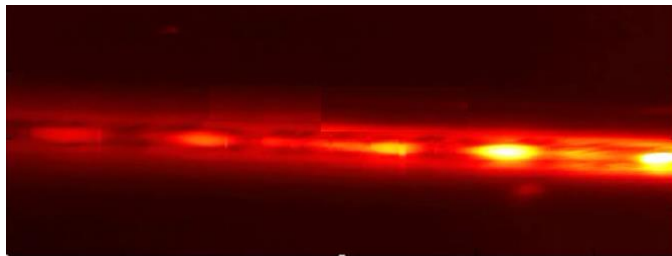


Figura 63. Imagen termográfica correspondiente a un proceso GMAW pulsado sin heterogeneidades

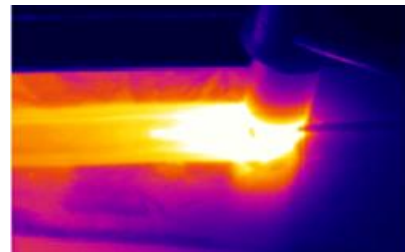


Figura 64. Imagen termográfica correspondiente a un proceso GTAW sin heterogeneidades

Finalmente el proceso más estable ha sido GTAW robotizado (Figura 64) por lo que todos los resultados que se muestran en el presente informe corresponden a dicho proceso.

Como se verá en la tarea (T4.2), la superficie obtenida no era lo suficientemente regular como para poder pasar un palpador de ultrasonidos. Por ello, el ensayo no destructivo seleccionado ha sido la inspección visual, ya que todos estos defectos son superficiales, perceptibles a simple vista y de dimensiones considerables.

3.4.2 Estudio de distintas alternativas de sistemas de inspección por termografía, selección de equipos e integración (T.4.2)

Para realizar los posteriores Hitos de control de defectología en tiempo real, se ha realizado un estudio con las diferentes posibilidades que hay en el mercado de cámaras termográficas, y la selección del equipo más adecuado.

a) FLIR

Las cámaras infrarrojas de montaje fijo, FLIR SC 60, se pueden instalar en cualquier sitio para controlar procesos de producción a partir de la detección y medion de diferencias de temperaturaya y la visualización de patrones de calor.



Figura 65. Cámara termográfica FLIR

La cámara FLIR constituye una excelente elección para trabajar en I+D ya que consigue la máxima frecuencia de imagen y una resolución de 640X480 píxeles.

Características principales.

- Imágenes de 640X480 y 16 bits a 50 Hz.
- Rango de temperatura de trabajo: -20 a 2000°C.
- Inicio y para de grabación en ResearchIR con entrada digital.
- Modo de ventanas: 640X240 a 100 Hz o 640 HX120 a 200Hz.
- Lentes de: 25°, 15° y 45°.

b) OPTRIS PI

Las cámaras infrarrojas optris PI 400 / PI 450 son las cámaras termográficas más pequeñas de su clase. Es capaz de grabar y capturar imágenes térmicas de tiempo real a alta velocidad.

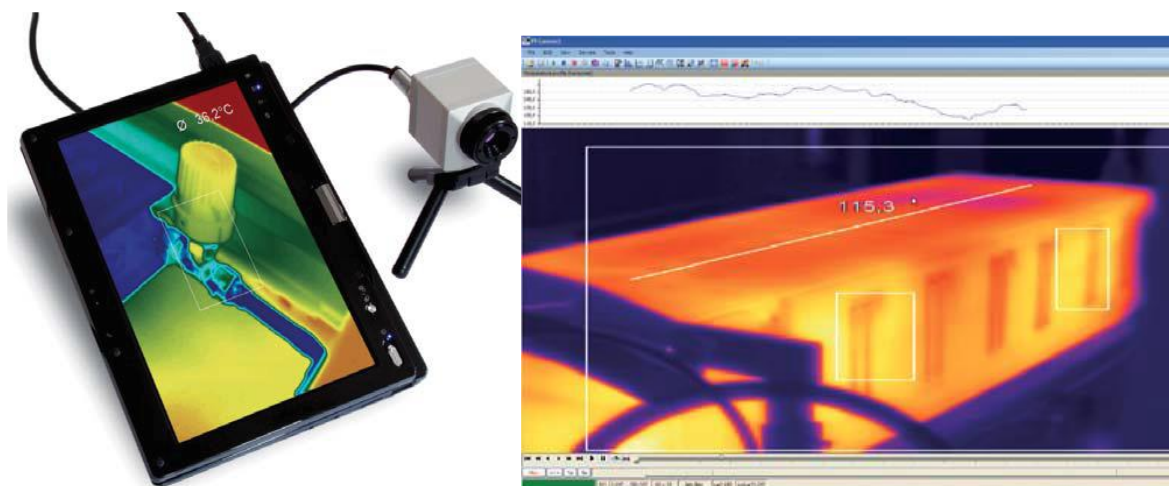


Figura 66. Cámara térmográfica Optris PI.

Características de la cámara:

- Rango de temperatura de trabajo de: – 20 a 900°C.
- Grabación de vídeo a tiempo real de hasta 120 Hz.
- Tamaño pequeño, resistente al agua y las lentes son intercambiables.

- Lentes de: 23°, 6° y 48°.

c) AMPERIS DM60

La cámara de imagen térmica DM60 es ideal para monitorización de procesos y medida de temperaturas. El sistema es perfecto para control de procesos y análisis. Además se utiliza con éxito en I+D, control de procesos industriales y seguridad pública.



Figura 67. Cámara termográfica Amperis DM60.

Características de la cámara:

- Sistema de proceso de imágenes DSP
- Imágenes térmicas de gran calidad, sensibilidad térmica de 0,1°C.
- Rango de temperaturas de trabajo: -20 a 1200°C.
- Enfoque manual y automático.
- Control remoto.
- Salida de datos MPEG-4.
- Bajo consumo energético y fuente de alimentación inteligente.

La cámara seleccionada es la FLIR, debido a las mejores propiedades, y a que soporta temperaturas más altas de trabajo de hasta 2000°, que son valores comunes en soldadura.

Para la integración de la cámara termográfica, se ha diseñado una placa de acero inoxidable a la antorcha, a ésta se atornilla otra chapa que es la que sujetaba la cámara como vemos en la Figura 68.

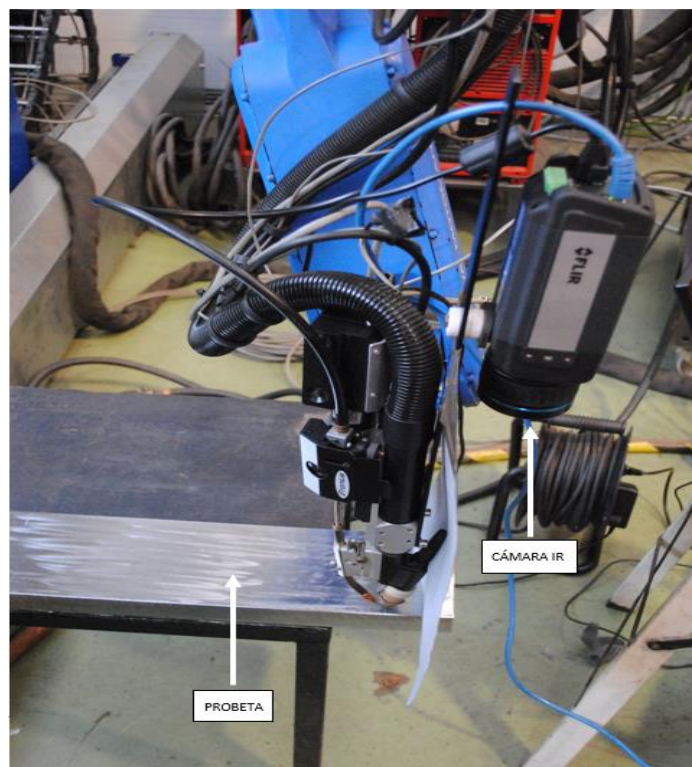


Figura 68. Disposición del sistema de medida infrarroja.

Esta cámara se sitúa detrás del cabezal de soldado, en la dirección de avance, para que vaya obteniendo la emisión infrarroja del cordón de soldadura. Es necesario tener en cuenta el ángulo de la imagen ya que si el ángulo es muy pequeño, serán otros objetos los que se reflejen en la imagen.

En la ejecución de esta tarea, y tal y como se había indicado en la solicitud de cambios presentada en fecha 12 de septiembre de 2017, ha sido necesario el desarrollo de un protocolo de comunicación a medida entre el robot y el PC externo de control que permita una correcta integración de los sistemas previstos en el proyecto .

Para ello, se ha desarrollado un código programado en C++, el cual mediante una interfaz gráfica permite subir archivos al robot mediante FTP. Esto se consigue ejecutando *ncftpput.exe* desde el código desarrollado con los parámetros necesarios.

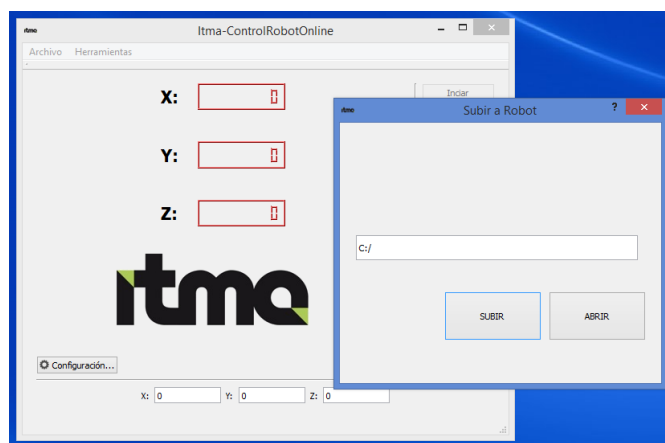


Figura 69. Interfaz gráfico

```

void DialogFTP::on_q_Subir_pushButton_clicked()
{
    QString remoteIP="192.168.255.200";
    QString space=" ";
    QString remotePath="/";
    QDir DIR;
    DIR=QDir::current();
    QString path=DIR.absolutePath();
    QString comand=path+"/ncftpput.exe -u rcmaster -p 99999999"+space+
        remoteIP+space+remotePath+space+filename;

    //unsigned char cmd=comand.toStdString().c_str();
    int ret=system(qPrintable(comand));//ncftpput.exe -u rcmaster -p 99999999 :
    //Alternativa a qPrintable() -->command.toLatin1().constData();
    //https://stackoverflow.com/questions/10798916/using-system-command-in-
    QString mensaje;
    switch(ret)
    {

    case 0:
        mensaje= "Success";//Devuelve 0
        QMessageBox::information(this,tr("Transeferencia exitosa:"),mensaje);
        this->close();
        break;
    case 1:
        mensaje="Could not connect to remote host.";
        QMessageBox::critical(this,tr("Transeferencia Erronea:"),mensaje);
        break;
    case 2:
        mensaje="Could not connect to remote host - timed out.";
        QMessageBox::critical(this,tr("ERROR:"),mensaje);
        break;
    case 3:
        mensaje= "Transfer failed.";
        QMessageBox::critical(this,tr("ERROR:"),mensaje);
        break;
    case 4:
        mensaje= "Transfer failed - timed out.";
        QMessageBox::critical(this,tr("ERROR:"),mensaje);
        break;
    case 5:
        mensaje= " Directory change failed.";
        QMessageBox::critical(this,tr("ERROR:"),mensaje);
        break;
    case 6:
        mensaje= "Directory change failed - timed out.";
        QMessageBox::critical(this,tr("ERROR:"),mensaje);
        break;
    case 7:
        mensaje= "Malformed URL.":

```

Figura 70. Código de la interfaz.

Los parámetros que se necesitaban para ellos son la dirección IP del robot, el puerto del protocolo FTP, el nombre de usuario y la contraseña de usuario. Además de la ruta del archivo local (PC) y la ruta de destino en el servidor FTP (robot), la ruta de destino es la carpeta raíz del FTP. En cuanto a la ruta del archivo local puede ser cualquiera del PC, por lo que se debe extraer para cada caso, para ello se ejecuta una ventana de explorador la cual nos permite abrir el archivo, de esta forma el código puede obtener el nombre del archivo y la ruta del mismo.

3.4.3 Realización de ensayos de soldadura y registro de señales termográficas (T.4.3)

a) Parámetros de calibración de las pruebas de termografía

Antes de realizar las pruebas, es importante explicar que la emisividad tiene un importante efecto sobre la imagen térmica. Un cuerpo de alta emisividad, tiene una temperatura aparente del cuerpo cercana a su temperatura real. Si por el contrario, si el cuerpo tiene baja emisividad, la temperatura del cuerpo es cerca a la temperatura aparente de los cuerpos cercanos. Dicho coeficiente tiene una fuerte dependencia tanto del material como de la temperatura.

Para la realización de las pruebas, se han realizado cordones de soldadura utilizando un consumible de acero inoxidable sobre metal base de acero el carbono. Esto supone una diferencia de emisividades entre los materiales, por lo que para realizar una correcta medición de los campos de temperatura es necesario el ajuste de la emisividad de los distintos materiales.

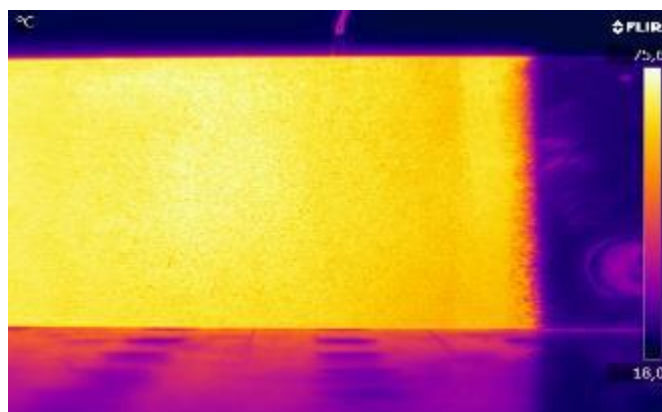


Figura 71. Imagen termográfica de calibración.

La Figura 71 muestra una imagen de la señal termográfica utilizada para realizar la calibración de la cámara termográfica, que a su vez permite demostrar las diferencias en la señal termográfica de materiales con distintas emisividades.

En este caso se trata de una placa de acero, que fue sometida a un calentamiento controlado, donde la temperatura fue medida a través de termopares. En dicha placa, se realizó un recubrimiento (zona izquierda de la Figura 71) de pintura de emisividad conocida, a la que la cámara fue ajustada (0.8). El lado derecho de la imagen (zona más oscura), pertenece a la región de acero pulido, con una emisividad de aproximadamente 0.3 a 80°C. Al ir calentando la probeta, se observa como la zona que proporciona una lectura de temperatura correcta es la zona de la izquierda, ya que se ha ajustado la emisividad de la cámara en función de este material en particular.

Adicionalmente, es necesario ajustar los parámetros de la atmósfera que rodea la cámara, ya que la radiación emitida por el cordón de soldadura, puede verse afectada por la temperatura atmosférica, humedad relativa, coeficiente de transmisión térmica y distancia.

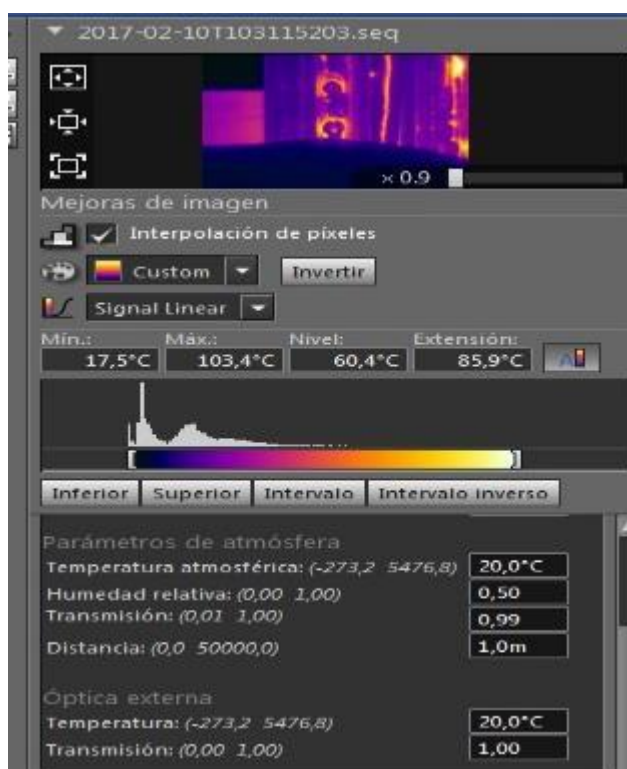


Figura 72. Parámetros de calibración introducidos para la realización del análisis termográfico.

b) Pruebas de termografía sobre soldadura GTAW

Una vez ajustados los parámetros anteriormente mencionados, se realizaron las pruebas de defectología sobre cordones de soldadura realizados con el proceso de soldeo GTAW (TIG).

En primer lugar, se realizó la soldadura de un cordón sano, sin defectos macroscópicos, que sirvió como referencia en el posterior análisis de defectología.

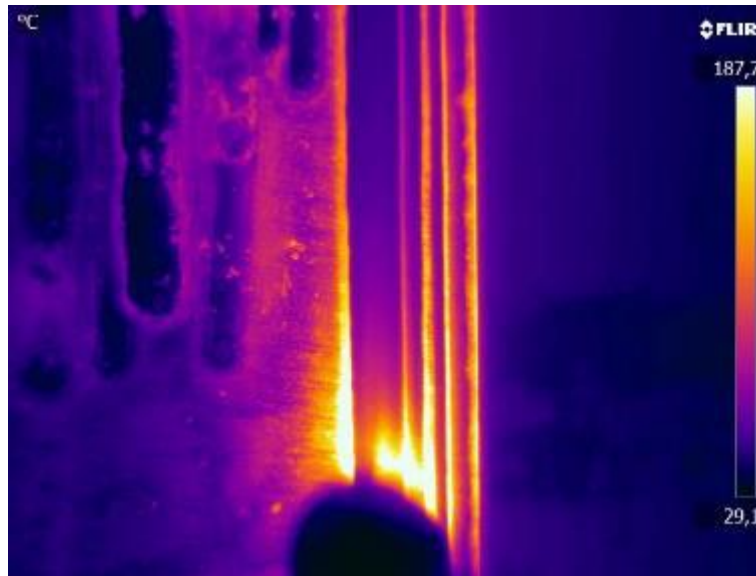


Figura 73. Imagen termográfica de un cordón de soldadura sin defectos a nivel macroscópico.

En la Figura 73 se puede observar la señal termográfica de un cordón sin defectos a nivel macroscópico. Tal como se ve en la imagen, es posible observar una superficie con una distribución de temperaturas constante en las sucesivas secciones transversales a la dirección de avance de soldeo.

La imagen muestra dos zonas donde no se detectan las temperaturas a las que se encuentran: la primera zona, corresponde al metal base en estado de pulido, que debido a una baja emisividad, presenta numerosas superficies reflectantes que proporcionan datos incorrectos a la cámara. La segunda zona corresponde a la zona más cercana al arco, cuya radiación es reflejada por el acero, proporcionando también lecturas falsas en la imagen (zona inferior).

Una vez establecidas las zonas correctas de lectura de parámetros de temperatura, es posible realizar análisis de los defectos en el cordón.

c) Pruebas GTAW con defectología inducida

- *Cambios en la trayectoria de soldeo*

La Figura 74 y Figura 75 muestran las imágenes termográficas obtenidas de un cordón de soldadura con varios cambios de trayectoria producidos a lo largo del proceso de soldeo. La señal infrarroja permite detectar los cambios en la posición de la emisión de radiación característica del cordón de manera notablemente precisa, resultando ser un método de control de trayectorias muy eficaz. Las señales infrarrojas muestran una temperatura superior en los límites del cordón, debido al cambio

en la conductividad térmica (menor disipación de calor del consumible de acero inoxidable), lo que delimita las dimensiones del cordón de manera más clara en el borde del cordón de soldadura.

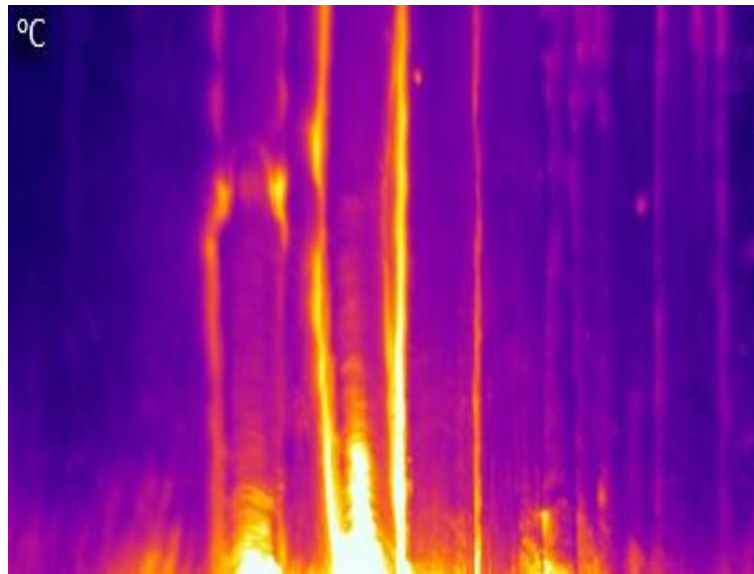


Figura 74. Imagen termográfica de cordón con cambio de trayectoria (1).

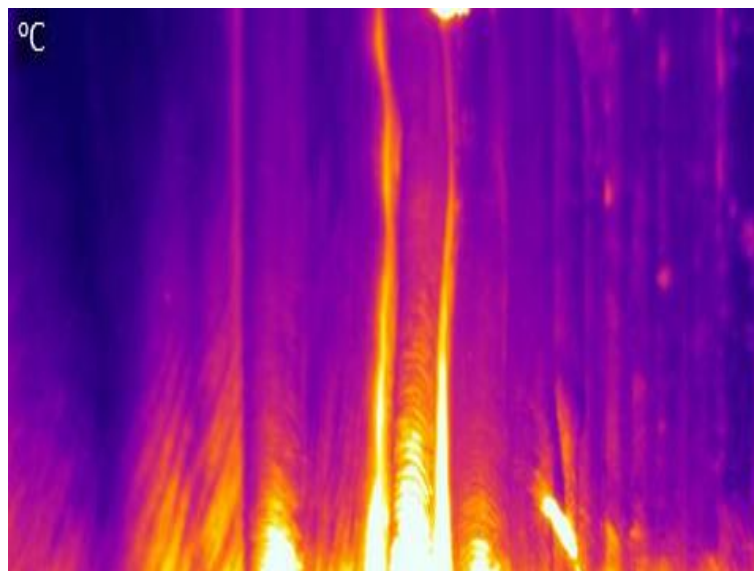


Figura 75. Imagen termográfica de cordón con cambio de trayectoria (2).



Figura 76. Imagen real del cambio de trayectoria según inspección visual.

En la Figura 76, se muestra la imagen de los efectos inducidos en el cambio de trayectoria, la detección de este defecto de manera temprana, es de utilidad en soldaduras multipasada que el cambio de trayectoria puede quedar ocultada por pasadas adyacentes.

- *Geometría del cordón soldado*

Al igual que en el análisis de las trayectorias del cordón, los cambios en la conductividad térmica en las áreas que delimitan la zona soldada, permiten distinguir con claridad la geometría del cordón de soldadura. La Figura 77 y la Figura 78 muestran zonas de exceso de material de aporte y un inadecuado empalme entre los cordones, generando un cordón de soldadura no admisible.

Mediante el análisis de la convexidad de los cordones de soldadura en uniones a tope o en ángulo, se puede determinar su adecuamiento ante sollicitaciones cíclicas (fatiga), en las que una excesiva convexidad actuaría como concentrador de tensiones. Por lo general, ante sollicitaciones cíclicas, se requiere un amolado de los cordones de soldadura hasta dejarlo plano y de esta manera evitar el concentrador de tensiones en el borde del cordón de soldadura.

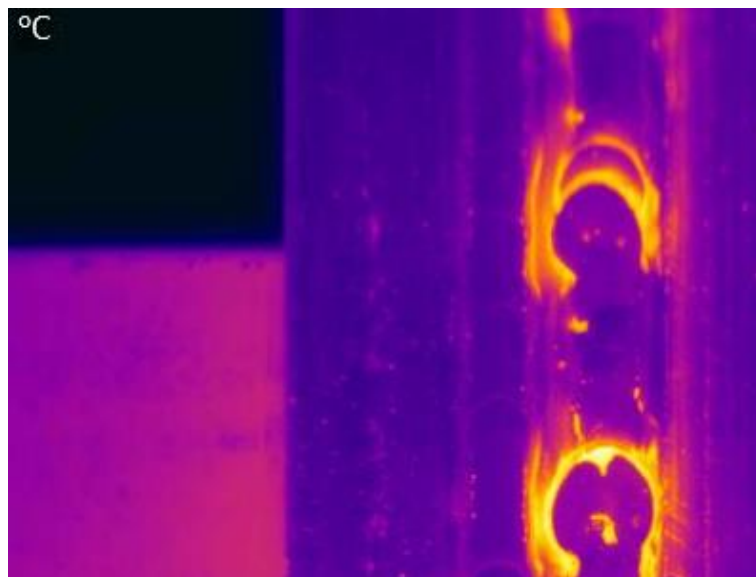


Figura 77. Cambios en la morfología del cordón (1).

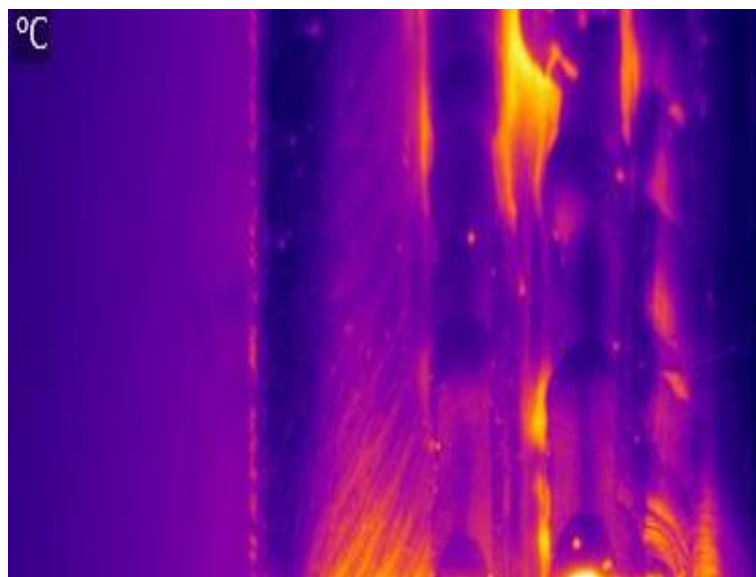


Figura 78. Cambios en la morfología del cordón (2).



Figura 79. Imagen real de la geometría del cordón

La Figura 77, Figura 78 y Figura 79 muestran la comparativa (termográfica frente a visual) de cordones afectados por defectos en su geometría, de manera muy precisa.

- *Proyecciones (o salpicaduras) de soldadura*

Las proyecciones o salpicaduras son porciones pequeñas de material de aportación que salen del cordón quedando alrededor de este. No es un defecto que se suele producir en el proceso de soldeo GTAW, a no ser que se suelde una zona en la que exista falta de limpieza. Generalmente, las proyecciones se suelen atribuir a los procesos de soldeo SMAW y GMAW, donde es necesario realizar una limpieza de las proyecciones al finalizar la soldadura.

A parte del efecto visual que tienen sobre las partes a soldar, las excesivas proyecciones de soldadura pueden ser un indicador de la presencia de defectos, que pueden generar un fallo prematuro de la unión. Además, una excesiva presencia de proyecciones de soldadura resulta en un aumento en costes de limpieza y en un mayor desperdicio de material de aporte.

Para simular proyecciones se introdujo agua y aceite en la trayectoria como se explica en la Tarea 4.1. La Figura 80 muestra la señal térmica de una proyección de soldadura (zona circular de mayor temperatura) y la Figura 81 muestra el efecto térmico de una zona de proyecciones agrupadas. La mayor emisividad infrarroja que se capta, es debido a que las proyecciones son partículas incandescentes provenientes del baño de fusión, que se encuentran a una mayor temperatura que el cordón de soldadura ya en proceso de enfriamiento. Para la detección, por medio de termografía, de este defecto es crucial la realización del análisis en línea, ya que al tratarse del material de aporte, su detección sobre cordón de soldadura en posteriores calentamientos es más difícil que sobre el propio metal base.

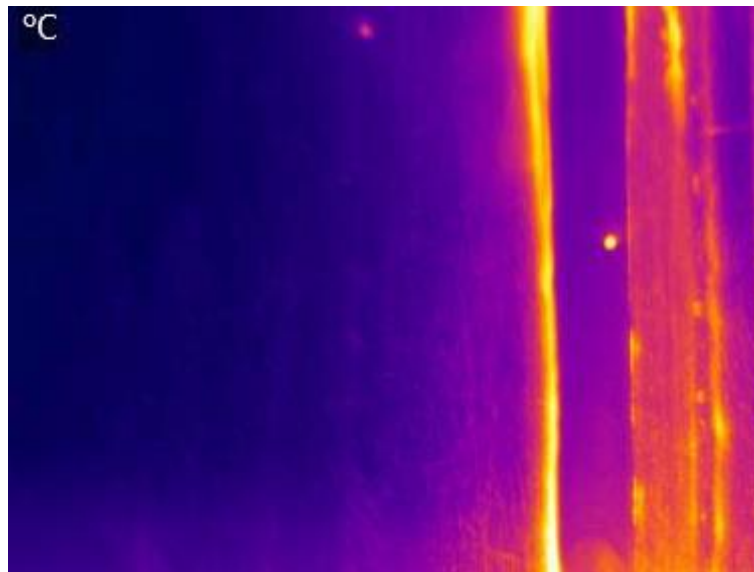


Figura 80. Proyección de soldadura.

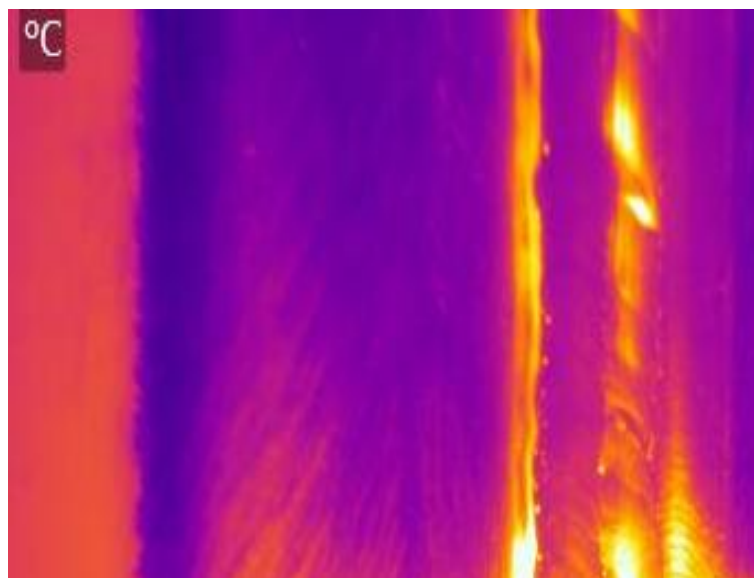


Figura 81. Proyecciones de soldadura agrupadas.



Figura 82. Imagen real las proyecciones inducidas.

Como vemos en la Figura 81 y Figura 82, la herramienta termográfica permite detectar con precisión dónde se producen las proyecciones.

- Porosidad

El defecto de porosidad es producido por falta de limpieza, defecto del material aportado, falta de gas de protección o fallo en la regulación de la soldadura creando bolsas de gas en el cordón de soldadura.

Los procesos de soldadura que generan una capa de escoria como los procesos de electrodo revestido (SMAW) ó soldadura por hilo tubular (FCAW), tienden a tolerar contaminantes de la superficie mejor que el GTAW, ya que en el material de aporte contienen componentes que ayudan a proteger el baño de fusión, en mayor medida que el proceso GTAW, contra el estado de limpieza superficial del metal base.

Otra causa para que se produzcan poros en el cordón de soldadura es la falta o exceso de gas de protección. En el proceso de soldeo GTAW se utiliza un gas inerte para proteger el baño de soldadura del el aire. Si se cierra o disminuye el caudal de gas lo suficiente para que no se produzca la protección del baño de fusión, se producirán poros por entrar el baño de fusión en contacto con el aire de la atmosfera. Por otro lado, si hay un exceso de caudal de gas de protección, este arrastrará el aire al baño de fusión.

Tal como se ve en la Figura 83 y en la Figura 84, las pruebas realizadas para introducir porosidad, muestran una señal térmica mucho más elevada que el cordón de soldadura, debido a la formación de poros superficiales que tienen gran emisividad térmica.

Debido a su forma característicamente esférica, la porosidad es considerada menos dañina que los defectos de forma alargada, ya que estos pueden producir el avance de la grieta bajo sollicitaciones cíclicas.

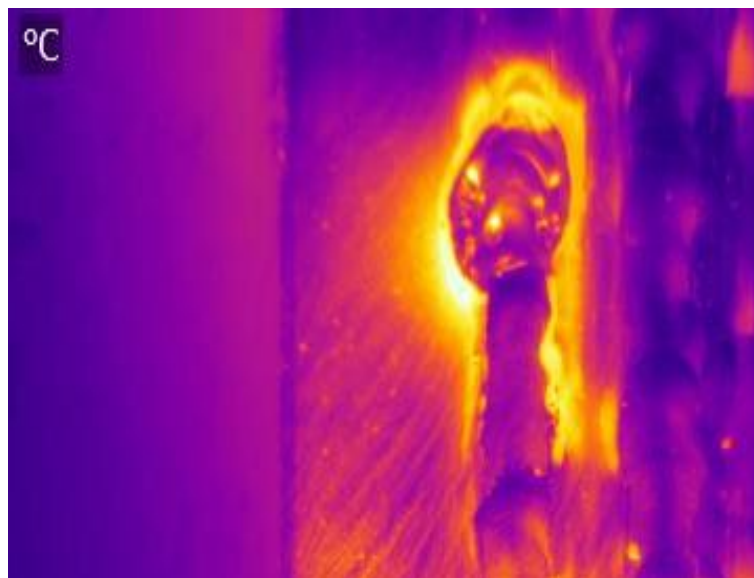


Figura 83. Cordón de soldadura afectado por porosidad (1).

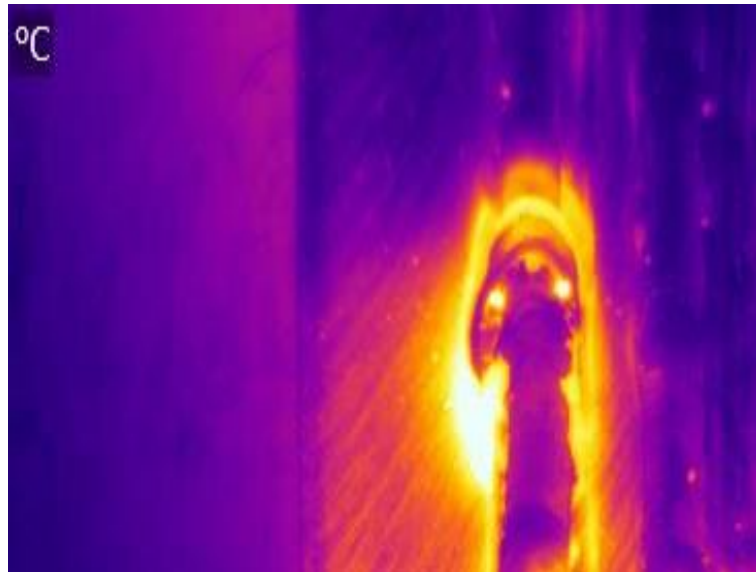


Figura 84. Cordón de soldadura afectado por porosidad (2).

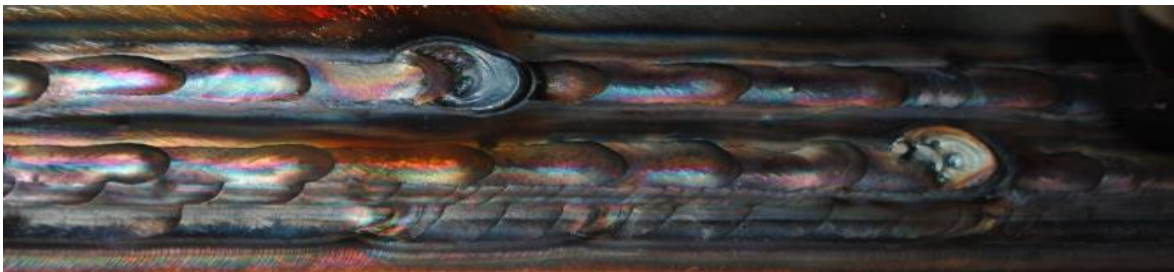


Figura 85. Imagen real de las porosidades inducidas.

En las Figura 84 y Figura 85 se puede ver la comparativa entre la inspección visual y análisis termográfico de una zona afectada por porosidad agrupada. Se puede observar que mediante la cámara termográfica se detectan dichas imperfecciones, pero es necesario realizar un estudio o la obtención de más datos de porosidades, para poder distinguir este defecto de otros como pueden ser las inclusiones o las proyecciones, ya que en la imagen termográfica se ven de forma similar la porosidad superficial, las proyecciones y las inclusiones

- Inclusiones

Las inclusiones, en el mayor de los casos se consideran un defecto subsuperficial o interno, es decir no puede ser detectado fácilmente por inspección visual, se necesita recurrir a los ensayos no destructivos como radiografías o ultrasonidos que permitan detectar este tipo de defecto, pero en este caso los defectos salen a la superficie.

En el proceso de soldeo GTAW se pueden producir inclusiones de tungsteno en el metal base si el electrodo es sumergido en el baño de fusión o si la corriente es muy alta, depositando gotitas de tungsteno en el baño de fusión que quedarán atrapadas durante la solidificación.

La Figura 86 y Figura 87 muestran las correspondientes imágenes térmicas de inclusiones de flux que fue depositado a lo largo de la trayectoria de soldeo. La señal térmica de las inclusiones depende en alto grado del coeficiente de emisividad del material que las compone, pudiéndose diferenciar de esta manera de la emisividad del cordón de soldadura.

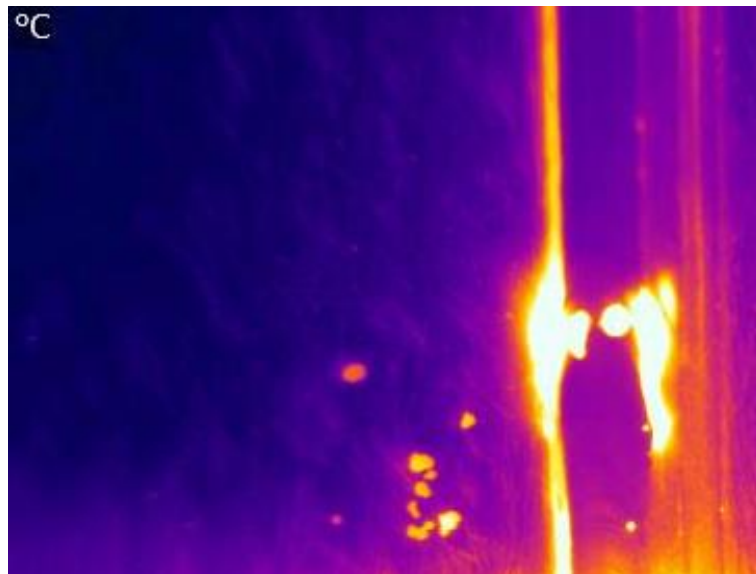


Figura 86. Inclusiones de flux en el cordón (1).

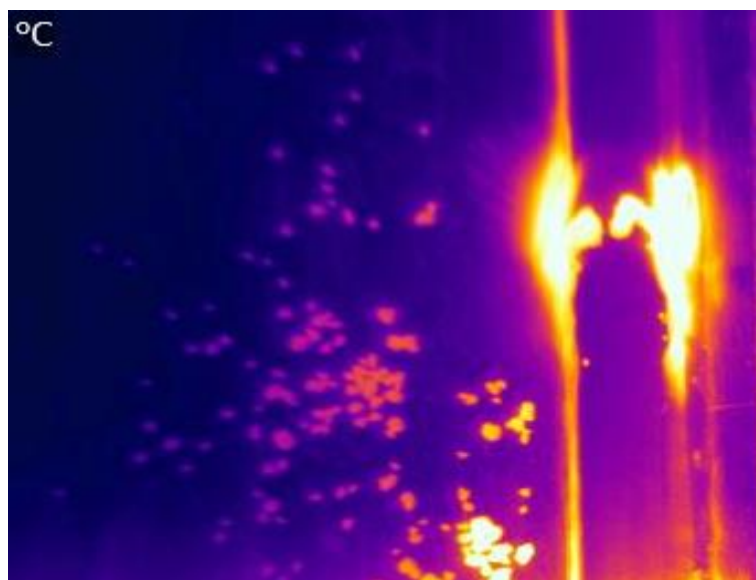


Figura 87. Inclusiones de flux en el cordón (2).



Figura 88. Imagen real de las inclusiones de flux.

La Figura 87 y Figura 88 muestran la comparativa entre la inspección visual de inclusiones por escoria, y su correspondiente señal termográfica.

- Entallas bajo el cordón de soldadura

Se practicaron entallas en la superficie del material sobre las que se ejecutó un cordón, con el objetivo de analizar la señal termográfica que refleja este tipo de defectos.



Figura 89. Entalla inducida sobre el material para su análisis termográfico.



Figura 90. Entalla inducida sobre el material para su análisis termográfico (2).

La Figura 89 y Figura 90 muestran las entallas que se realizaron sobre el material base. El resultado del análisis termográfico sobre estos defectos, no mostró cambios apreciables en la distribución de temperaturas con respecto a los análisis de un cordón sano sin defectos.

Por tanto, se deduce que, para el material y la calibración aplicada, el análisis termográfico no es capaz de realizar la detección de defectos internos, por debajo de una profundidad de 10 mm.

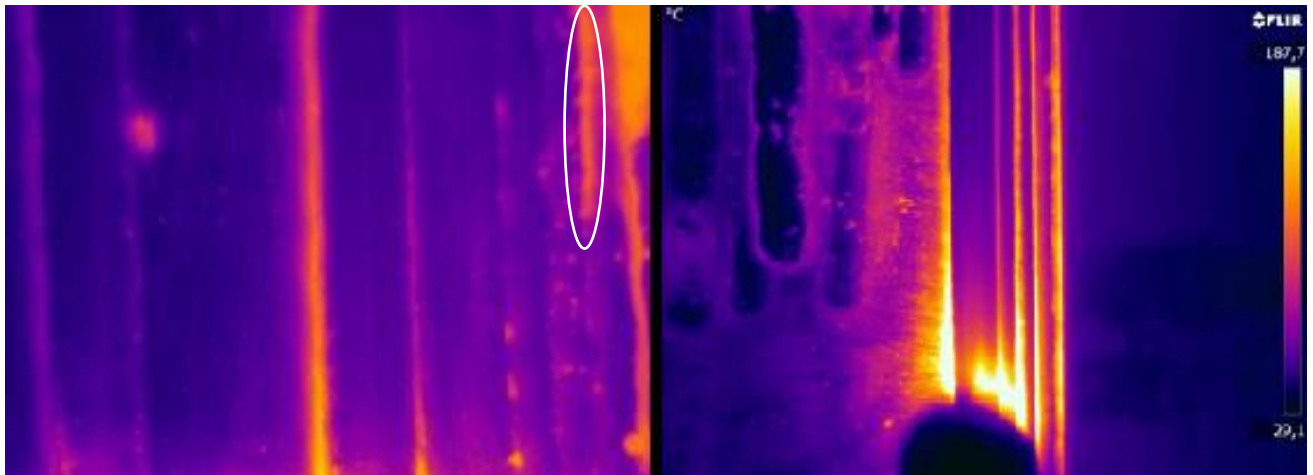


Figura 91. Comparativa entre cordón con entalla inducida (izda) y cordón sano (dcha).

Finalmente, tras un proceso de selección, todos los tipos de defectos inducidos han resultado ser superficiales. Al tratarse, la fabricación aditiva, de un proceso de fabricación basado en la adición de material mediante pequeñas pasadas, los estudios de detección de defectología han sido realizados con un solo cordón y no se ha incluido ningún defecto de tipo volumétrico. Por ello, todos los casos estudiados son detectables a simple vista. Por tanto, el tipo de ensayo no destructivo (NDT) seleccionado para esta tarea ha sido la inspección visual, descartándose las técnicas volumétricas en los que no hace falta la detección de los mismos mediante ensayos no destructivos.

En la tarea correspondiente a la fabricación de demostradores si se han realizado ensayos volumétricos. En concreto, la inspección por radiografía. Los ensayos destructivos realizados han sido metalográficos.

3.4.4 Integración de sistemas de espectrofotometría y optimización de la captura de luz (T4.4)

El análisis de espectrometría de plasma es una técnica ampliamente utilizada, con aplicaciones en muchos campos, como caracterización química o monitorización de procesos industriales. En particular, en la soldadura, una detección en tiempo real durante el proceso, reduce los retrabajos que conlleva la realización de ensayos no destructivos. En esta tarea, se estudiarán los diferentes tipos de espectrómetros que hay en el mercado [8].

El esquema que se utiliza en estos casos es el que se muestra en Figura 92.

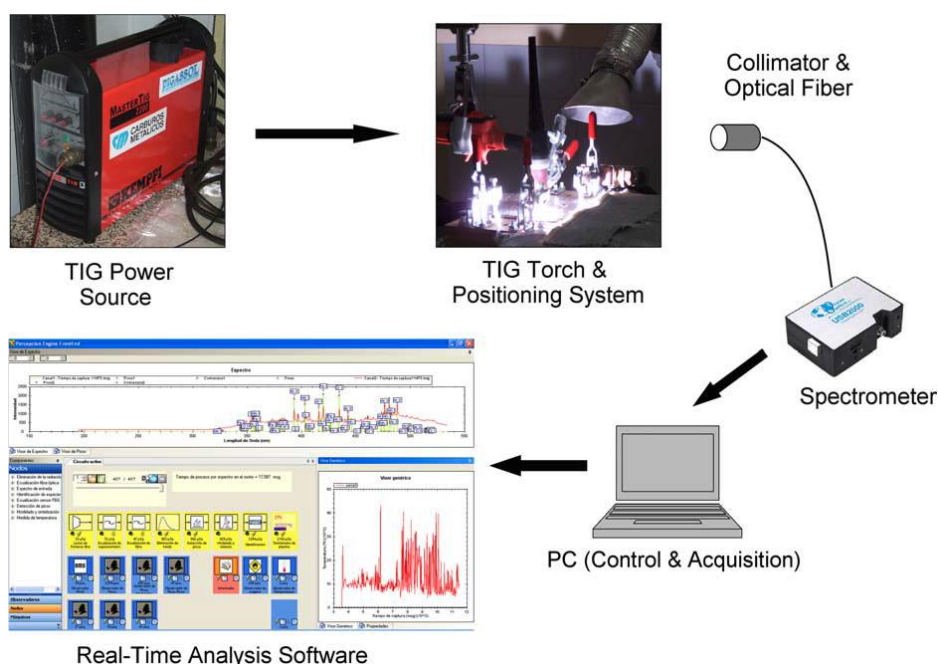


Figura 92. Esquema para medir las imperfecciones mediante espectrometría.

a) Ocean Optics USB 2000

Los espectrómetros USB modulares son muy versátiles y de se utilizan para la absorción, transmisión, reflectancia, emisión, color y otras aplicaciones. Tienen un tamaño compacto, robusta robusta optoelectrónica.



Figura 93. Espectrómetro de fibra óptica USB 2000.

	USB2000+
Respuesta de longitud de onda (200-1100 nm)	Buena respuesta a la radiación UV; Mejor respuesta para <350 nm.
Velocidad de transferencia de datos	Escaneos completos a la memoria 3 ms con puerto USB.
Rango dinámico	8.5×10^8 (sistema); 1300:1 para una singular adquisición.
SNR	250:1 (a señal completa).

b) Glacier X (Agilent Technologies)

El Glacier X es el espectrómetro refrigerado, es la solución perfecta para aplicaciones que requieren alto rendimiento y portabilidad. Está equipado con un conjunto de CCD lineal de 2048 elementos, un digitalizador incorporado de 16 bits y una interfaz USB 2.0 de alta velocidad.



Figura 94. Espectrometría de fibra óptica Glacier X.

Este equipo ofrece un mayor rango dinámico, recuentos oscuros significativamente reducidos y una estabilidad de línea de base superior, lo que lo convierte en el espectrómetro ideal para la detección de niveles bajos de luz y aplicaciones de monitoreo a largo plazo. Las configuraciones de longitud de onda están disponibles desde 200nm hasta 1050nm con resoluciones entre 0.2nm y 4.0nm.

c) TIDAS S 700 / CCD UV/NIR 2098

Los espectrómetros TIDAS S combinan modularidad, flexibilidad, facilidad de uso y alta calidad. Los espectrómetros TIDAS S están disponibles en varios rangos de longitudes de onda según el rango que se necesite para los materiales de estudio. En concreto el analizado es entre 200-980 nm.



Figura 95. Espectrometría de fibra óptica TIDAS S 700

El espectrómetro de fibra óptica seleccionado es el **TIDAS S 700**, ya que son longitudes de onda comunes de estudio, que han servido para este proyecto y que puedan servir para proyectos posteriores.

3.4.5 Realización de ensayos de soldadura y registro de señales de espectrometría (T4.5)

Debido a los altos requisitos de calidad que existen en la industria, se buscan cada vez, análisis de los procesos de soldadura en tiempo real para reducir los tiempos y los costes que ello supone. Por ello, en esta tarea se ha estudiado la espectrometría de emisión de plasma que permite evaluar los defectos que se pueden producir en la soldadura en línea.

El principio físico en el que está basado la espectrometría de emisión de plasma es que los fotones emiten una determinada longitud de onda o frecuencia después de la absorción de alguna energía. Esto se puede comparar, ya que un átomo y sus iones y moléculas pueden emitir fotones en diferentes longitudes de onda, pero una longitud de onda está relacionada solo con un átomo o un ion o molécula. En este caso, se realizó un estudio cuantitativo, extrayendo información de los espectros tomados, en este caso la intensidad de la radiación emitida por algunas líneas espectrales [9].

La principal ventaja de este proceso es la detección de discontinuidades en línea, que en comparación con los exámenes no destructivos convencionales, permite detectar el defecto en la fase de producción, pudiendo ser reparado inmediatamente [10].

En esta tarea mediante la espectrometría de emisión plasma se obtienen las longitudes de onda y se comparan con la longitud de onda patrón, que en este caso se estudió la del hidrógeno (656nm) y la del argón (738nm). Con objeto de comprobar que los datos obtenidos son buenos, se han contrastado con análisis radiográficos (Ver Tabla 9), con la colaboración de APPLUS.



a)



b)



c)

Figura 96. Sistema monitorizado. a) unidad central instalada en la línea de soldadura. b) cabeza del sensor de fusión. c) fibra óptica en la antorcha.

Una vez diseñado el sistema monitorizado con el sensor y una vez conectado el espectrómetro al PC, se realizaron los análisis de los defectos y ese comparó con el resultado del análisis radiográfico. Estas comparaciones se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Pruebas de defectología mediante espectrometría.

Número de prueba	Parámetros de estudio	Defectos (Rayos X)
1	Soldadura correcta	Mordeduras / Ex. penetración
2	Soldadura correcta	Mordeduras / Porosidad
3	Inclusiones de agua	Mordeduras / Porosidad
4	Inclusiones de aceite	Mordeduras / Porosidad
5	Inclusiones de disolvente	Porosidad / Ex. penetración
6	Reducción del flujo de gas	Mordeduras/porsosidad
7	Inclusiones de agua y aceite	Mordeduras / Porosidad Ex. Penetración / Grietas

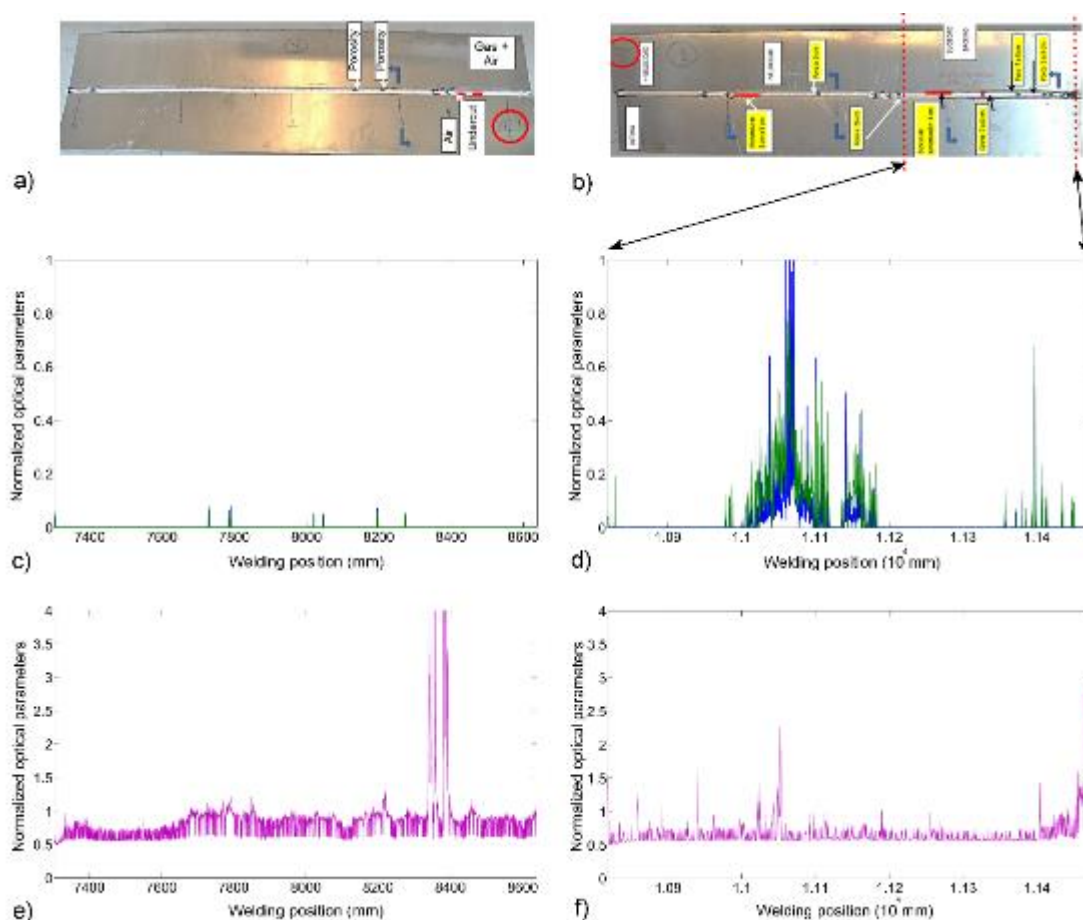


Figura 97. Resultados mediante espectrometría de las pruebas 6 y 7.

La Figura 97 describe dos de los ensayos realizados (6 y 7), donde se realizó una reducción del flujo de gas Figura 97 (a) e inclusiones de aceite y agua Figura 97 (b). Las figuras (c) y (d) muestran los perfiles H generados utilizando la línea H en 656nm, representando su intensidad frente a dos líneas diferentes (396nm (línea azul más gruesa) y 670nm (línea más delgada verde)). Se puede observar que la falta de limpieza da lugar a una clara contaminación del proceso en la figura (d) lo que puede conducir a la formación de porosidades. También cabe señalar que las porosidades aisladas detectadas en la inspección radiográfica en la prueba 6 no se detectan a través del perfil de espectrometría, lo que implica que probablemente se generen por una perturbación diferente. En este caso, el perfil Ar (figura e) indica claramente la mordedura y también una de las porosidades detectadas. Estos perfiles Ar se crearon considerando la línea Ar en 738nm vs la línea Ar en 763nm.

3.4.6 Implementación de resultados, concordancia de señales-defectos (T4.6)

Una vez obtenidos los resultados de los defectos por ambos métodos, en esta tarea se pretende concretar qué defectos son mejormente detectables por cada método.

En el estudio por termografía las señales obtenida, presentan buenos resultados en la detección de los defectos superficiales analizados en la tarea (T4.3), en este caso se ha hecho una comparativa mediante inspección visual.

En el caso de la espectrometría, como se ha analizado en la tarea (T4.5), se obtienen muy buenos resultados en la detección de la porosidad y de una mordedura que detecta claramente, estos resultados han sido contrastados mediante radiografía.

En los dos casos de END en tiempo real estudiados es que son fácilmente adaptables a todos los tipos de soldadura. La principal diferencia, que con los ensayos de espectrometría óptica de láser se pueden detectar todos los defectos, incluso los internos. Pero sin embargo con el proceso termográfico sólo se detectan defectos superficiales.

En la espectrometría óptica láser es necesaria una previa calibración con una soldadura en buen estado y otra en mal estado y contrastar las señales obtenidas mediante radiografía o ultrasonidos.

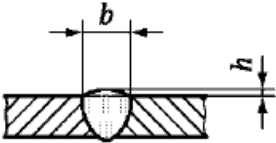
Para la correlación entre las señales térmicas obtenidas en las pruebas con GTAW, y las inspecciones visuales realizadas posteriormente se han inducido los defectos mencionados en la Tabla 10 y se han medido por ambas técnicas. En el caso de la espectrometría se han correlacionado las mediciones espectrométricas y las radiográficas. De esta manera se ha intentado establecer una correspondencia entre los límites establecidos para las indicaciones por los códigos de fabricación y las señales obtenidas por la técnica termográfica y espectrométrica, como medio para plantear un sistema de detección de defectología en línea automático.

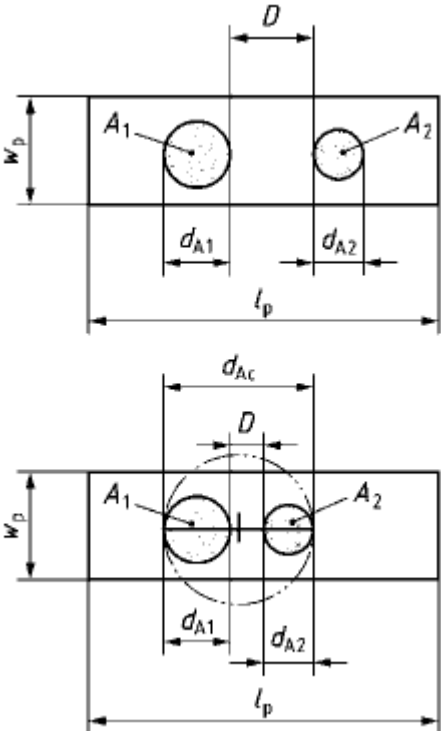
Se establecerá, cuando aplique, una correlación entre los defectos inducidos en los cordones, y la norma UNE-EN ISO 5817: 2014 'Soldeo. Uniones soldadas por fusión en acero, níquel, titanio y sus aleaciones (excluido soldeo por haz de electrones). Niveles de calidad para las imperfecciones' [9], que determina el tamaño de las indicaciones admisibles según los criterios de calidad de la norma UNE-EN ISO 6520-1:2009 'Soldeo y técnicas afines. Clasificación de las imperfecciones geométricas en los materiales metálicos. Parte 1: Soldeo por fusión'.

En la norma UNE-EN ISO 5817: 2014, se establecen 3 niveles de calidad. Se designan por las letras B, C y D. Siendo B el más restrictivo. En este caso, se utilizaron los límites de las imperfecciones para el nivel de calidad C. El espesor estudiado ha sido de 10 mm, que ha sido con el que se ha establecido los límites de las imperfecciones para el nivel de calidad C.

Los límites de las imperfecciones estudiadas en ambos casos se dan en la Tabla 10.

Tabla 10. Límites de las imperfecciones

Designación de la imperfección	Observación	t (mm)	Límite de las imperfecciones para el nivel de calidad (C)
Cambios en la trayectoria	-	-	-
Geometría del cordón de soldadura (Sobreespesor)		$\geq 0,5$	$h \leq 2,5$ mm, máx. 7mm
Proyecciones (o salpicaduras)	-	$\geq 0,5$	La aceptación depende de la aplicación (por ejemplo, del material, de la protección contra la corrosión, etc.)
Poros	Se deben satisfacer las siguientes condiciones y límites para las imperfecciones.		

<p>Porosidad uniformemente distribuida</p>	<p>a) Medición máxima de área proyectada de (incluidas las imperfecciones sistemáticas) referida al área proyectada.</p> <p>b) Medida máxima de la sección transversal de las imperfecciones (incluidas en las imperfecciones sistemáticas) referida a la sección de la rotura (aplicable solamente a cupones de ensayo: cupones de producción y ensayos de cualificación de soldadores y procedimientos).</p> <p>C) Medida máxima para un poro aislado en: – soldaduras a tope.</p>		<p>Para una sola pasada: $\leq 1,5\%$ Para múltiples pasadas: $\leq 3\%$</p> <p>$\leq 1,5\%$</p> <p>$d \leq 3, \text{máx. } 4 \text{ mm}$</p>
<p>Porosidad agrupada</p>	 <ul style="list-style-type: none"> – La longitud de referencia para lp es 100 mm. – El área total de la porosidad dentro del agrupamiento se representa por un círculo de diámetro dA rodeando todos los poros. – Todos los poros dentro del círculo deben cumplir los requisitos para un poro aislado. Se permite un área de porosidad local. Se deben tener en consideración la posibilidad de que la porosidad agrupada de lugar a otra imperfección. – Si D es menor que dA1 o dA2, cualquiera que sea menor, entonces el total de área de porosidad se representa por un círculo de diámetro dAC, donde $d_{AC} = d_{A1} + d_{A2} + D$. 	<p>$\geq 0,5$</p>	<p>$d_A \leq 20 \text{ mm}$</p> <p>o</p> <p>$d_A, \text{máx. } \leq 10 \text{ mm}$</p>

	<ul style="list-style-type: none"> – No se permite porosidad sistemática agrupada. – dA corresponde a dA1, dA2 o dAC, cualquiera que sea aplicable. 		
Inclusiones sólidas Inclusiones de escoria Inclusiones de fundente Inclusiones de óxido	– Soldadura a tope	$\geq 0,5$	$h \leq 3$, máx. 3 mm
Entallas bajo el cordón	-	-	-

3.5 ANÁLISIS DE OTRAS TÉCNICAS DE SOLDADURA PARA ADDITIVE WELDING (HITO 5)

3.5.1 Análisis de potencialidad de EBW para Additive Welding

En los últimos años hay que destacar la evolución exponencial de las tecnologías de fabricación aditiva, que en un plazo de apenas veinte años (Figura 98), se han posicionado como una respuesta factible y fiable, tanto desde un punto de vista técnico como económico para un amplio rango de productos de tirada corta, geometría compleja y alto valor añadido. Claros ejemplos son los productos personalizados solicitados en biomedicina o en el sector aeronáutico.[5]

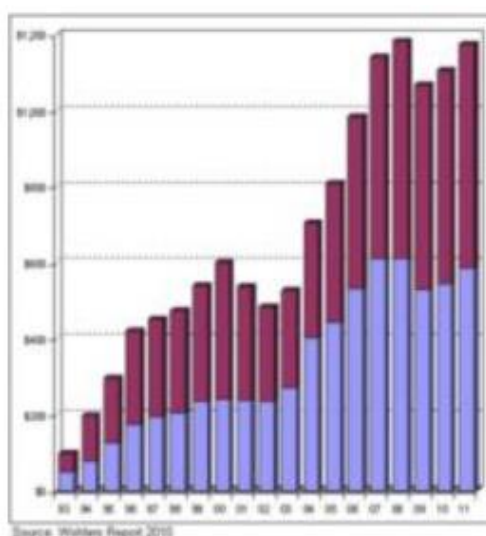


Figura 98. Ingresos (\$) de servicios por fabricación aditiva a nivel mundial
 La parte inferior indica los productos y la parte superior indica los servicios

El uso de esta nueva tecnología acompaña las necesidades actuales de las empresas de disminuir el tiempo de ciclo del desarrollo y fabricación de productos. Estos cambios responden también a los requerimientos de los usuarios, teniendo en cuenta los conceptos conocidos como "producción personalizada" y/o "personalización", que por otra parte implica ciclos de vida cada vez más cortos para dichos productos.

El proceso EBW es uno de los procesos más potentes (proporción 1/100 en potencia y velocidad de soldadura) de manera que admite una amplia variedad de materiales y espesores a soldar, por lo que también está catalogado como un proceso muy flexible.

a) Clasificación de las diferentes tecnologías existentes en sus últimas evoluciones de fabricación aditiva.

Se pueden clasificar las diversas tecnologías disponibles según dos criterios: por método de aporte de material y por el de aporte de energía para la consolidación. El material de construcción se puede aportar en diversos estados: sólido en polvo, sólido en varilla o hilo, en lámina de espesor constante o líquido. Según el método de aporte de material se distinguen tres sistemas: punto, línea o lecho.

Por otro lado, la agregación del material para formar una capa sólida y la consolidación entre cada capa, y con las próximas a ella, requiere un aporte de energía o de adhesivo, lo que también es determinante de la calidad final del producto resultante y de sus características mecánicas, eléctricas, etc.

Se pueden clasificar también los métodos de aporte de energía para la solidificación del material y consolidación de capas según la densidad de aplicación de la energía, de forma similar a como se ha hecho con los sistemas de aporte de material: sistemas 0D, sistemas 1D y sistemas 2D.

En general, el aporte de energía se realiza en forma de calor o de luz ultravioleta. Con calor se puede producir fusión de metales o termoplásticos, o polimerización de ciertos plásticos, mientras que otros materiales son fotosensibles y sufren un proceso de curado y solidificación al someterlos a radiación ultravioleta.

La combinación del método de aporte de material con el de aporte de energía determinan la rapidez esperada del sistema. Es fácil comprender que si la construcción aditiva debe ser selectiva en cuanto a qué puntos deben solidificar y cuáles no, si se emplean sistemas de aporte de material en exceso, la energía se debe aplicar de forma selectiva y localizada, mientras que si se aporta el material de forma selectiva, el aporte de energía puede ser desfocalizado.

La fuente de energía y los sistemas de posicionamiento son los dos elementos que determinan en gran medida el coste de inversión de las máquinas de AM (Additive Manufacturing) y de la calidad de los sistemas físicos que posicionan el material en la localización deseada o que aportan la energía concentrada en las posiciones requeridas, depende la precisión y reproducción geométrica en la pieza fabricada.

Hay otro elemento más que es común a todos los sistemas y es el elemento mecánico de movimiento de cambio de capa. Como no se puede construir en el aire, se debe disponer de una plataforma sobre la que se deposita y adhiere el material correspondiente a la primera capa en los sistemas de aporte selectivo o que se cubre completamente de material en los sistemas de aporte masivo. Se suele denominar plataforma de construcción. Una vez finalizada la construcción de la primera capa sobre la plataforma, esta desciende el espesor correspondiente al espesor de una capa, de modo que la máquina genera la siguiente, y así sucesivamente. La altura de construcción de piezas está, pues, limitada por la carrera máxima del sistema de desplazamiento de la plataforma de construcción. Es un elemento delicado porque de su precisión depende

en gran medida la precisión geométrica de la pieza fabricada, y a la vez debe soportar todo el peso de la pieza y del material aportado para rellenar el volumen de fabricación en el caso de sistemas de lecho completo. En las máquinas de gran capacidad que existen actualmente (Mammoth de Materialise o la SLM 500 de MTT Group) este peso puede representar varias toneladas de material. [7]

A continuación se explican brevemente los principales procesos de AM.

ESTEREOLITOGRAFÍA-SLA

A esta se la considera la precursora del resto de tecnologías de prototipado rápido. La primera patente fue realizada por Chuck Hull en 1986, originando la primera máquina de 3D Systems en 1987. Esta técnica de fabricación consiste en solidificar resinas en estado líquido y sensibles a la luz ultravioleta mediante un láser, capa a capa. El láser “dibuja” la parte que en cada capa corresponde a sólido sobre la superficie del material líquido contenido en una cuba, de modo que el material no afectado por la luz permanece líquido y el expuesto a la radiación se agrega y solidifica. La plataforma de construcción en el fondo de la cuba baja el equivalente al espesor de una capa y se rellena el nivel con líquido de aporte y, dada la viscosidad de este, se debe eliminar el exceso con un recoater. Los espesores de capa típicos son de unos cien micrómetros. Permite fabricar piezas con geometrías muy complejas y espesores muy finos, y existe una amplia variedad de resinas epoxi actualmente en el mercado para conseguir características muy diversas, como transparencia, flexibilidad, materiales biocompatibles, etc. No en vano es la tecnología más extendida y antigua. Uno de los problemas es el de las medidas de prevención de los trabajadores para el manejo de las resinas base epoxi.

Las características de los materiales se degradan en mayor o menor medida a lo largo de la vida del producto si está, por ejemplo, expuesto a la luz solar, lo que provoca un curado continuo, y no son resistentes a la temperatura, afectando ambos factores a las propiedades mecánicas. Durante la fabricación se necesitan estructuras de soporte para las partes en voladizo y para unir las piezas a la plataforma de construcción. Estos soportes y uniones son del mismo material, se fabrican a la vez y deben ser eliminados a posteriori de forma manual, ya que dejan marcas en la pieza, lo que obliga a un lijado posterior. Ese hecho puede imposibilitar la realización de ciertas piezas con cavidades internas de gran tamaño a las que no se pueda acceder al eliminar el soporte.

La empresa belga Materialise ha desarrollado la máquina de AM más grande del mundo, que está basada precisamente en tecnología de estereolitografía, con una capacidad de trabajo de 2100 x 700 x 800 mm. [8]

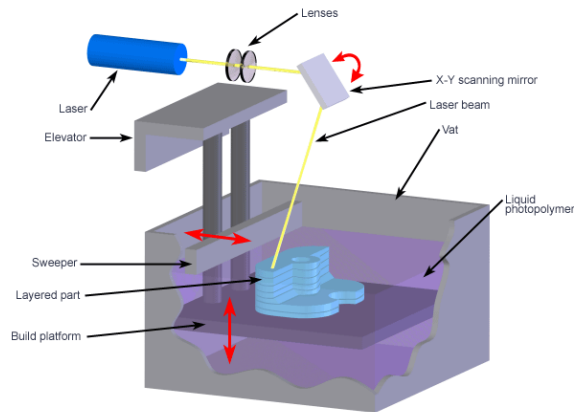


Figura 99. Funcionamiento estereolitografía

ARALDITE DIGITALS

Es el sistema de AM más reciente, presentado en diciembre de 2008. Se trata de tecnología de lecho líquido de resinas fotosensibles, al igual que la estereolitografía. El curado selectivo se realiza de un solo paso mediante un brazo transversal que realiza un movimiento lineal de velocidad constante a lo largo de la cuba. En este brazo va alojada una fuente de producción de luz que es colimada y canalizada mediante fibra óptica hacia una placa en la que se distribuyen uniformemente un total de 40.000 microobturadores o Micro Light Switches. Estos elementos se accionan individualmente e interrumpen o no el paso de la luz, dando lugar a una matriz o máscara de una sola línea, de modo que realiza un solo barrido por capa. La resolución horizontal es de 10 micras en sentido transversal y es seleccionable ajustando la velocidad de barrido del brazo, de modo que a mayor velocidad los pixel resultan alargados hasta 10, 50 o 125 micrómetros. Se trata de sistemas muy rápidos comparados con SLA, aunque con los inconvenientes de los materiales. También se necesitan estructuras de soporte, con los mismos inconvenientes y problemas ya señalados. El movimiento descendente de la cuba y el de rellenado de material hasta el nivel configuran el crecimiento vertical, en capas de 50 a 150 micrómetros.



Figura 100. Equipo ARALDITE DIGITALS

IMPRESORAS 3D 3DP

Existe cierta ambigüedad en el uso de este término, ya que han sido varios los fabricantes que han posicionado sus máquinas en este sector, y por tanto distintas las tecnologías involucradas. La mención a Impresoras 3D pretende hacer llegar al mercado la imagen de que se trata de algo tan sencillo, limpio, económico y fácil como una impresora de papel, pero en tres dimensiones. Es más, algunas marcas han pasado a posicionar sus productos desde el original de «Prototipado Rápido» a «impresoras 3D» y, a continuación, cuando la nueva tendencia es la fabricación, cambian su marketing para llamarlos Rapid Manufacturing, tratándose del mismo fabricante y la misma tecnología.

Las impresoras 3D de Z Corporation utilizan inyectores estándar de impresoras de chorro de tinta para depositar selectivamente micro gotas de un adhesivo diluido sobre un lecho de polvo. Los materiales tienen base de yesos adecuadamente formulados y, en aquellos puntos en los que se deposita adhesivo, se aglutina y reacciona para formar un cuerpo sólido. La plataforma de construcción baja el espesor de una capa y un recoater de rodillo aplica una nueva capa sobre la anterior. La humedad remanente permite fijar parcialmente el polvo de la nueva capa sobre ella. Un nuevo avance del brazo con el cabezal recorriéndolo continuamente genera una nueva capa, y así sucesivamente, como haría una impresora de chorro de tinta convencional.

La característica diferencial de estas máquinas es que existen modelos con cuatro depósitos de líquido, uno para el adhesivo y otros para tintas de colores, y el cabezal dispone a su vez de tantos inyectores como depósitos. Esto permite imprimir piezas directamente en color exactamente igual a cualquier impresora de chorro de tinta sobre papel. El modelo más reciente de Z Corporation dispone de sistema de cuatricomía (YCMB) lo que mejora el rendimiento de color y contraste. [9]



Figura 101. Ejemplo de impresora 3D 3DP

SINTERIZADO SELECTIVO LÁSER METÁLICO Y CERÁMICO

Durante los años noventa, tanto la empresa DTM como EOS GMBH desarrollaron esta tecnología orientada a la fabricación de núcleos complejos para fundición en arena.

Para ello se utiliza arena o cerámicas con un ligante (resina) como material de aporte. Mediante un láser se funde el ligante en aquellas zonas en las que en la capa en cuestión corresponde a sólido. Al fundirse solo uno de los materiales, se llama «selectivo». Durante la fase líquida moja y adhiere al material de aporte, que queda fijado al enfriar y solidificar el ligante. La bandeja de construcción baja el espesor de una capa, el recoater aporta y nivela más material, y el proceso se repite hasta la altura completa. La pieza obtenida es frágil (verde). En el caso de la arena para machos de fundición, ya se puede usar directamente.

DTM procesa metales con esta misma tecnología. La pieza en “verde” así formada se somete a un proceso térmico, en el que el ligante se elimina dejando un esqueleto poroso de metal, que se rellena por una infiltración con bronce, obteniéndose así la pieza definitiva formada por dos metales. Las características de los productos así obtenidos son pobres y el proceso resulta muy largo e impreciso, comparado con la fabricación directa de piezas que se indica a continuación.[10]



Figura 102. Equipo de sinterizado láser selectivo

DIRECT METAL LASER SINTERING: DMLS

Durante los años noventa, la empresa alemana EOS GmbH desarrolló una variante del proceso de sinterizado selectivo, en el que tanto el ligante como el material de aporte son metálicos. El ligante es una aleación de bajo punto de fusión como el bronce. La máquina se carga con una mezcla homogénea pulverizada en grano fino del material ligante y los materiales de aporte, como Ni, u otros aceros de buenas cualidades. Al incidir el láser, la aleación ligera se funde y moja el material de aporte, para enfriar y solidificar a continuación. De este modo se evita el paso de la eliminación del ligante y la infiltración en horno de tratamiento. Los productos obtenidos de forma directa tienen más precisión geométrica, más densidad, menos porosidad y mejores propiedades térmicas que en el caso anterior.

Posteriormente EOS GmbH presenta una nueva generación de máquinas dotadas con láser de estado sólido y fibra óptica, cuya longitud de onda es absorbida por los metales, lo que da lugar a que se puedan fabricar piezas directamente en aleaciones comerciales, como aceros de herramienta, aceros maraging, inoxidable, aleaciones de cromo-cobalto, titanio y aleados, aluminio, inconel, hastelloy, etcétera. Las propiedades de estos materiales equivalen en ciertos casos a las de las aleaciones comerciales con el mismo nombre, en cuanto a composición química, estando en proceso su validación a nivel mecánico, propiedades a corrosión, etc.

El peor inconveniente de esta tecnología es la necesidad de un esmerado diseño de los soportes, que cumplen varias funciones:

- Mantener la pieza sujeta a la plataforma
- Soportar los voladizos
- Conducir y disipar parte del calor de fusión para reducir las tensiones internas
- Control de defectología de la microsoldadura.
- Técnicas de inspección

La eliminación de los soportes es una tarea manual ardua que limita notablemente la expansión de esta tecnología; incrementa el coste de pieza en concepto de postprocesado, mecanizado, pulido, etc. Hay varios fabricantes que emplean este proceso de fusión por láser de metales y le asignan distintos nombres: mientras EOS GmbH mantiene el antiguo de DMLS, Concept Laser GmbH (grupo Hofmann) lo denomina Laser Cusing, MTT Technologies le da el nombre de Selective Laser Melting o SLM.[11]

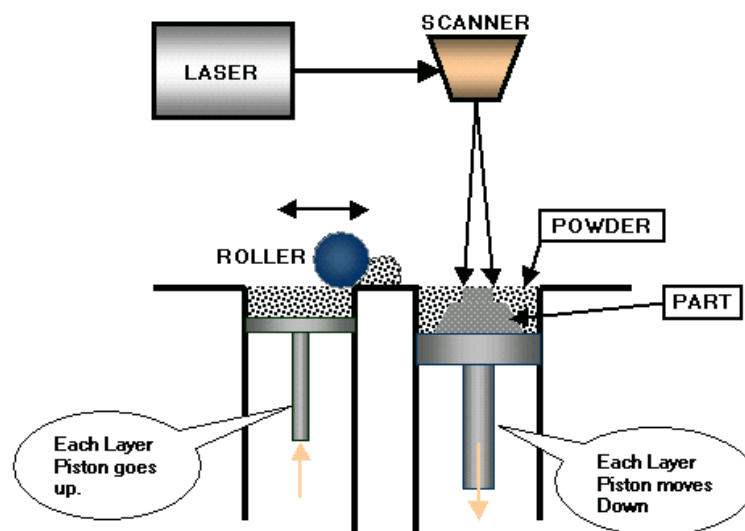


Figura 103. Funcionamiento Laser sintering

ELECTRO BEAM MELTING: EBM

La tecnología EBM (Electron Beam Melting) funde polvo metálico, en vacío por la acción de un haz de electrones. El proceso EBM fabrica añadiendo el material por capas, es decir, el polvo metálico (con tamaño de partícula entre 45 y 100 micras) es repartido en una fina capa sobre el área de trabajo. El haz de electrones funde el polvo metálico selectivamente siguiendo exactamente el patrón de la sección geométrica de la pieza para cada capa. Estos dos pasos se repiten hasta que la pieza se ha fabricado. El espesor de capa puede variar entre 70 (alta calidad), 100 y 200 μm (alta productividad). En cada capa del proceso de fabricación, el haz de electrones realiza un precalentamiento del área de trabajo para elevar la temperatura (específica para cada aleación) antes de fundir el polvo. Como resultado, las piezas obtenidas por EBM, tienen menor nivel de tensiones residuales que el proceso anterior y sufren, por tanto una menor distorsión al enfriarse.

Recientemente, la empresa ARCAM ha desarrollado la tecnología EBM MultiBeam™, que utiliza la electrónica de control para dividir el haz de electrones en múltiples haces de electrones de menor potencia; esta estrategia permite fundir múltiples zonas del área de trabajo simultáneamente controlando la cantidad de energía suministrada en cada punto. Este avance permite obtener mejor acabado superficial, detalles y estructuras porosas 3D sin perjuicio de la productividad.

Como en otras tecnologías de AM, algunas regiones de la pieza pueden requerir soporte para asegurar una correcta fabricación. En el caso particular de la tecnología EBM, este soporte es añadido para evacuar el exceso de calor de la zona de la pieza donde incide el haz de electrones, ya que se dispone de mayor potencia. Estos soportes se pueden retirar fácilmente y es deseable orientar la geometría, de forma que se añadan los soportes donde la pieza requiera un mecanizado posterior. Además, al procesar con alta temperatura, añade la ventaja de que el polvo no procesado se encuentra en un estado semisinterizado que tiene la capacidad de soportar algunas zonas geométricas; esta característica le permite ser la única tecnología de AM de metal que puede fabricar estructuras 3D sin necesidad de utilizar soportes.

El vacío en la cámara de trabajo le permite procesar materiales metálicos reactivos, como es el caso de las aleaciones de titanio o aluminio, y conseguir una alta pureza en el proceso de fusión. La tecnología EBM se caracteriza por su alta productividad comparada con tecnologías SLM, pudiendo llegar a procesar hasta 60 cm³/hora de material gracias a los 3000 W de potencia del haz de electrones.

Esta tecnología fue por primera vez comercializada por la empresa sueca Arcam en Goteborg en 1997. El proceso es similar al sinterizado por láser, pero en este caso la fuente de energía es un cañón de electrones acelerados hasta aproximadamente 0,8 veces la velocidad de la luz. Al impactar contra el lecho de polvo, desprenden la energía en forma de calor que funde el material. Dado que el haz de electrones es concentrado y deflectado mediante campos electromagnéticos, es decir, no hay sistemas mecánicos móviles de espejo, se consiguen elevadas velocidades de recorrido del haz sobre el lecho. Una de las limitaciones de este sistema es que, al tratarse de partículas con masa, parte de la energía se transmite como cinética y el polvo se levanta de su lecho produciendo una pequeña nube que interfiere con el propio haz; este hecho limita el tamaño mínimo de polvo que se puede emplear y, en consecuencia, la precisión y acabado de las piezas. El proceso se encuentra limitado a materiales conductores y a superficies que como en otros procesos de este tipo necesitan un postprocesado para su acabado definitivo. Otra de las particularidades es que trabaja en cámara de vacío con el material precalentado entre 600 y 800 °C, lo que en materiales como el titanio representa una ventaja metalúrgica. Por el contrario obliga a esperar un tiempo de enfriamiento para retirar el material sobrante y las piezas, lo que penaliza su productividad. [12]

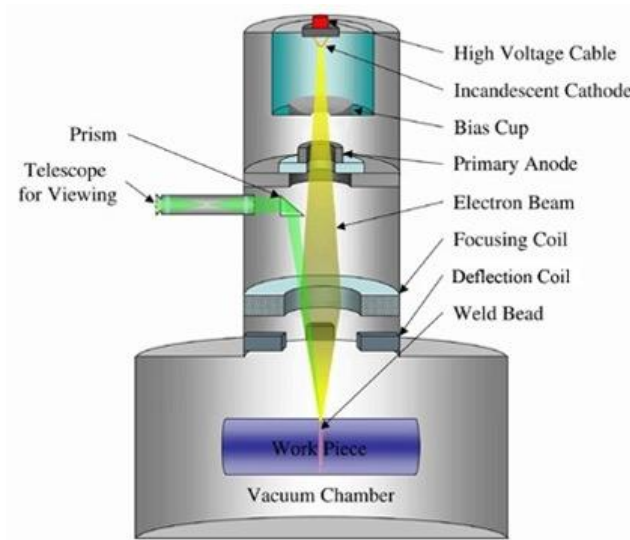


Figura 104. Equipo para EBM

FUSED DEPOSITION MODELING: FDM

Este proceso, comercializado por primera vez por Stratasys en 1991, está basado en hacer pasar un hilo de material de aporte, normalmente ABS aunque se puede ajustar para otros termoplásticos, por una boquilla caliente. El material se funde y se hace pasar a través de dicha boquilla, de modo que cede parte de su calor al material ya enfriado depositado en la capa anterior sobre la que se apoya, y al que por lo tanto se adhiere, y se solidifica formando el aporte de la nueva capa.

La boquilla debe ir recorriendo en trayectorias más o menos complejas toda el área que en cada capa corresponde a material sólido. Hay máquinas que disponen de varias boquillas y varios cargadores de carretes de hilo, con lo que pueden fabricar piezas de distintos colores, aunque no pueden mezclarlos. Esta tecnología necesita soportes que se realizan en el mismo material y por tanto son tan resistentes como la propia pieza, que a posteriori deben ser eliminados, dejando marcas visibles. Los sistemas que se comercializan no requieren personal altamente cualificado, son bastante autónomos y necesitan un escaso mantenimiento. Son por otro lado lentos, lo que penaliza mucho su productividad, y la calidad superficial de los modelos es muy baja en comparación con otros procesos. [13]

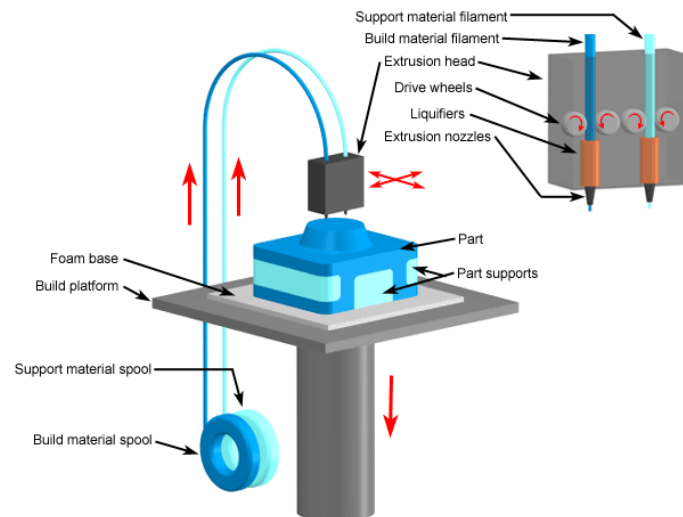


Figura 105. Funcionamiento equipo FDM

LASER CLADDING

Se puede decir que estas tecnologías nacen como evolución de las de soldadura y recargue láser. Este grupo de tecnologías se caracteriza por utilizar una boquilla que alimenta material (según el caso, polvo o varilla) justo en el punto en el que se aplica una fuente intensa y concentrada de energía, como un láser o plasma. El material de aporte se funde sobre el sustrato y solidifica inmediatamente. Normalmente se proyecta gas inerte alrededor del punto de fusión para proteger el caldo. La aplicación inicial fue la de reparar o recargar piezas de alto coste y normalmente de gran tamaño, como turbinas, hélices, etc. En estos casos el cabezal es móvil y se desplaza siguiendo las trayectorias programadas.

Hay sistemas de AM basados en esta tecnología con diversas configuraciones:

- Cabezal fijo y mesa móvil orientable: El cabezal está en posición vertical hacia abajo, mientras la placa de construcción está sujeta a un cabezal de hasta cinco ejes
- Cabezal superior móvil y mesa móvil: Tiene más complejidad en la programación, pero más libertad en las geometrías
- Cabezal móvil y mesa fija: El cabezal puede tener varios grados de movimiento, con importantes limitaciones de las geometrías que se pueden construir, y suelen alimentar hilo o varilla.

En principio no existen limitaciones a los materiales de aporte salvo las relativas a parámetros de proceso de soldadura. No se realizan estructuras de soporte, aunque en ciertas geometrías pueden llegar a requerirse, y teóricamente se podrían construir. Estas tecnologías entran dentro del AM porque, aunque las capas de adición no son todas iguales y paralelas, sí es cierto que se construye aportando material allí donde se necesita y que, al menos localmente, el aporte se produce en capas.[14]

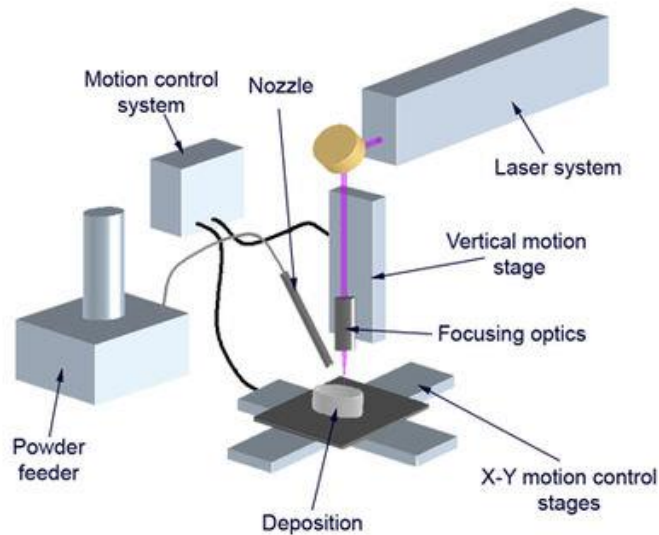


Figura 106. Funcionamiento laser cladding

ATOMIC DIFFUSION

Se trata de una de las tecnologías más punteras en el ámbito de la fabricación aditiva. Con esta impresora 3D, no sólo hablamos de poder hacer piezas finales en metal, sino que también es posible hacer moldes para piezas plásticas en cuestión de días.

Esta tecnología funciona depositando capa tras capa el metal en forma de fino polvo 'atrapado' en un aglutinante termoplástico, obteniendo una pieza metálica en gran medida, pero con los gránulos de polvo metálico pegados entre sí con plástico. Una vez terminada la fase de impresión 3D, la pieza pasa a un proceso de sinterizado en el que se elimina el termoplástico y se produce la sinterización de los gránulos de metal que se unen unos a otros. Según indica la firma, al producirse el sinterizado de la pieza al completo, la unión del metal se produce en todas las direcciones, eliminando en buena parte la anisotropía habitual de los procesos capa a capa.

De momento, se puede usar acero inoxidable 17-4 y 303, acero de herramienta para moldes de inyección y otros metales están aún en preparación y empezarán a estar disponibles a lo largo del año.

ELECTRO BEAM WELDING

La soldadura por haz de electrones (EBW) es una técnica de unión de metales utilizada para crear uniones de alta integridad y con una mínima distorsión.

Es un método que utiliza una corriente concentrada de electrones generados por un filamento y dirigida a la unión que debe soldarse. El calentamiento está muy localizado y la mayor parte del conjunto permanece fría y estable. El control informatizado garantiza una mínima dependencia del operador, proporcionando así una buena reproducibilidad a lo largo de un lote de componentes.

El cañón de haz de electrones que se utiliza en EBW produce los electrones y los acelera, utilizando un emisor de **cátodo caliente hecho de tungsteno** que emite electrones cuando se calienta. Los electrones son acelerados a continuación a un hueco ánodo dentro de la columna de la pistola por medio de un diferencial de alta tensión. Pasan a través del ánodo a alta velocidad (aproximadamente 1/2 de la velocidad de la luz) y se dirige entonces a la pieza de trabajo con las fuerzas magnéticas resultantes de enfoque y bobinas de deflexión. Estos componentes están alojados en un rayo de electrones la columna de la pistola, en el que se mantiene un vacío duro (aproximadamente 0,00001 torr).

Tal y como se indicaba en la memoria de solicitud, la soldadura por EB puede también convertirse en una técnica de recrimiento controlado de materiales metálicos, participando por tanto como tecnología para el additive welding. La baja distorsión térmica sufrida por los materiales base, puede permitir un mayor grado de control en la ejecución multicapa que necesita un recargue para recrecer una pieza. La posibilidad de transformar la energía cinética de los electrones acelerados en sistema del haz en energía calorífica, mediante el impacto de los mismos en la superficie de trabajo, facilita la concentración del calor superficial y teóricamente la precisión de la deposición de materiales mediante polvo o hilo sobre el sustrato. Esta tecnología tendría un ratio de deposición superior a la sinterizado laser pero inferior a la de los procesos por arco de soldadura, encontrándose a medio camino de las dos técnicas. Sin embargo el grado de calidad del material depositado y su diseño metalúrgico sería más similar al proceso de soldadura por arco.

b) Elementos de los equipos de EBW

- **Cámara**

En las máquinas universales actuales, la cámara es rectangular de acero al carbono o de acero inoxidable (no magnético) y su superficie interior está finamente pulida.

Incluye una amplia abertura de acceso provista de puerta(s) de ojo de buey para permitir la observación directa de la operación desde el exterior. El recinto está conectado al sistema de bombeo a través de una válvula de aislamiento (véase Figura 107). Este recinto alberga todos los componentes necesarios para el trabajo de la pistola y su mecanismo de ajuste y/o el desplazamiento. También recibe todo el mecanismo(s) de motorizado al que se unen las herramientas y que se encargará del movimiento de la pieza durante la soldadura.

Añadir que el tiempo de vacío es importante porque afecta directamente a la productividad de la planta.

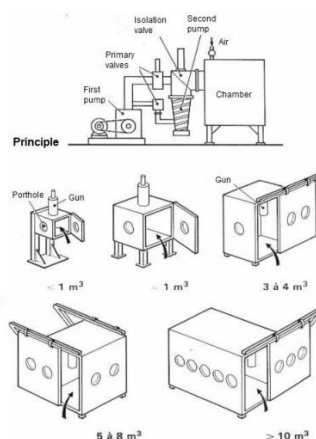


Figura 107. Cámaras de soldadura EBW

Se clasifican en varias categorías:

- Maquinaria universal, definida por su carga de trabajo y el tiempo de vacío.
- También hay que distinguir entre máquinas con pistola externa fija (Figura 108 a), y las máquinas de pistolas de electrones de alta tensión, o máquinas con un cañón interno móvil (Figura 108 b).
- Maquinaria específica adaptada para soldar piezas en serie y diseñadas para reducir los tiempos de carga y bombeo sobre la productividad, se puede distinguir mecanismos con plato giratorio y los que tienen dos posiciones alternativas (Figura 109).
- Por último, para satisfacer algunas necesidades muy especiales (Figura 110).

<p>Electron gun Vacuum chamber Tools EB Welding System with a fixed external gun Electron gun Vacuum chamber Workpiece EB Welding System with a mobile internal gun</p>	<p>Gun Vacuum chamber Workpiece Gun Workpieces</p>	<p>Gun Plateau Sliding carriage</p>
<p>Figura 108. Máquinas de soldadura EBW</p>	<p>Figura 109. Máquinas plato giratorio (a) y dos posiciones alternativas (b)</p>	<p>Figura 110. EB tipo de máquina de soldadura en vacío</p>

- **Pistola**

La pistola se caracteriza por su potencia, es decir, por el producto de la tensión de aceleración por su intensidad.

El haz de electrones se genera y centra gracias a la pistola, está provista de un cátodo calentado a la emisión térmica y un sistema de lente de enfoque magnético (véase Figura 111).

Una pistola de soldadura comprende, generalmente, dos secciones principales: una sección eléctrica y una sección magnética, de simetría axial y colineales (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. b).**

En la primera sección, los electrones emitidos por el cátodo son encauzados en el haz convergente por un conjunto de dos electrodos, el Wehnelt (electrodo de control para ajustar la intensidad del haz) y el ánodo, cuya geometría se define rigurosamente con el fin de crear un espacio entre ellos y mediante la aplicación de un alto voltaje adecuado (Wehnelt al negativo, positivo y el ánodo a tierra), una red de superficies y efecto de convergencia equipotenciales.

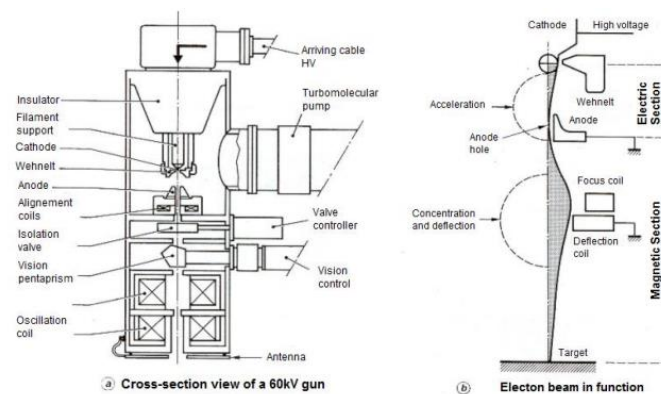


Figura 111. Pistola de soldadura EBW

- **Sistema de Bombeo**

Este sistema consiste generalmente en dos o tres pisos de los sistemas convencionales de bombeo: la bomba principal, bomba de raíces y las bombas de difusión (Figura 107).

Se dimensiona de acuerdo a lo siguiente:

- Tiempo de operación de vacío del recipiente (rendimiento global del sistema) limitada a unas pocas decenas de minutos
- Nivel de vacío de la operación (número de plantas). Distinguimos, en términos de sistema de bombeo, dos tipos de instalaciones:
- Máquinas de vacío completas, inferiores o iguales a 10^{-4} Torr ¹($\approx 1,3 \times 10^{-2}$ Pa);
- Máquinas de vacío parcial, y de alrededor de 10^{-3} a $5 \cdot 10^{-3}$ Torr ($\approx 1,3 \times 10^{-1}$ a $6,5 \times 10^{-1}$ Pensilvania).

Por encima de 10^{-3} Torr, el haz comienza a divergir muy rápidamente y esto afecta a la potencia específica y la sección de la zona fundida

¹ 1 Torr = 1 mm / Hg = 133 / Pa = 1,33 mbar

c) Fabricantes

En cuanto a los **equipos y fabricantes actuales**, hoy en día, existe CVE en Gran Bretaña, SAF (Air Liquide), Techmeta (Bodycote) en Francia, y AWT en Alemania, es decir que hay un número elevado de empresas que pueden ofrecer una gran variedad de equipos especializados en esta aplicación.

Una clasificación típica de las máquinas de haz electrónico se hace dividiendo en máquinas de baja tensión y de alta tensión; máquinas de 60kV para aplicaciones simples disponibles para la alta producción, para aplicaciones altamente automatizadas, o en combinación con otros procesos como una célula de producción completa; y los equipos de 150kV que se utilizan como equipos muy flexibles, para aplicaciones altamente sofisticadas o en productos muy sensibles, por ejemplo en el espacio e industria aeronáutica.

Sin embargo, hay una nueva tendencia dentro del sector de la industria pesada, la reactivación de la soldadura de penetración profunda que gracias a las nuevas capacidades del equipo de EBW es fácilmente ejecutable.

Tabla 11. Equipos y componentes de fabricantes

Compañía	Ofertas	Equipos	Aplicaciones
Cambridge Vacuum Engineering (CVE) (Inglaterra)	2.500.000-4.999.000€	60kV y 150 kV electron beam welders	Automoción, petroquímica, aeroespacial, nuclear
Air liquide welding (Francia)	166.400.000€	Electron beams machines from 3 to 45kV	Aeronáutica, mecánica, nuclear, armamento, automovilística, componentes hidráulicos y neumáticos
Bodycote Techmeta (Francia)	12.560.000€	Electron beams machines from 3 kV to 100kV	---
Pro-beam AG & Co.	10.000 €	60Kv to 150 kV	Atomomovilística
KGaA (Alemania)	49.999.000€	mass production (165RT, 360RT), universal systems (K7, K26, K40, K65, K140, K230, K480, K640, K3000, K6000, cell cube, cell1800), special systems (K190, K200, S450)	Aeroespacial
PTR Präzisionstechnik GmbH (Alemania)	10.000.000 - 49.999.000€	Universal systems, production systems	Automoción, mecánica, aeroespacial, construcción
Steigerwald Strahltechnik GmbH (Alemania)	10.000.000 - 49.999.000€	60kV and 150kV: EBOCAM®, EBOCONT®, PKseries	Automoción, aeroespacial, construcción
Pavac Industries Inc. (Canada)	19.082.844€	100kV and 150-200kV 100kV combined EBW, drilling & machining systems	Energía, automoción, defensa, medicina, electrónica, laboratorios
Advanced Vacuum Resources (U.S.A.)	1.338.318€	6kV and 25kV	---

Electron Beam Engineering Inc. (U.S.A.)	1.487.218€	Small chamber EBW systems: 3Kvto5kV	Medicina, aeroespacial, electrónica, automoción
PTR-Precision Technologies, Inc. (U.S.A.)	3.717.121 - 7.436.146€	Standard EBW Systems (large, medium, small), Special EBW Systems (EBOMAT-K, S7EB)	Aeroespacial, defensa, automoción, medicina, electrónica, petroquímica
Sciaky, Inc. (U.S.A.)	7.436.146€ - 14.872.550€	60kV EBW system, 2kV- 40kV NG1-EVO system	Aeroespacial, militar

d) EBW en la fabricación aditiva

La gran ventaja de aplicación de la soldadura por haz de electrones para la fabricación aditiva es la baja aportación de calor en las partes soldadas y en consecuencia una distorsión mínima, además se trata de un proceso económicamente rentable para grandes producciones, adicionalmente en su mayoría no se requiere mecanizado secundario.

Las propiedades únicas de la soldadura por haz de electrones permiten su aplicación a un amplio rango de materiales en el área de la fabricación aditiva y combinaciones de materiales diferentes que por otros métodos de soldadura por arco presentaría gran dificultad.

La soldadura por haz de electrones es un proceso muy adecuado para materiales como aluminio y sus aleaciones debido a que la película de óxido de alto punto de fusión que interfiere con otros procesos de soldadura, aquí se destruye fácilmente por la intensidad del impacto de los electrones. El decapado de la superficie de la pieza en la zona de soldadura previo a la soldadura reduce la capa de óxido y por lo tanto mejora el comportamiento de flujo y la calidad de soldadura con porosidad reducida. Es posible alcanzar profundidades de soldadura de 200 mm con cordones de soldadura muy estrechos.

Casi todas las aleaciones de cobre -excepto el latón y la alpaca - son relativamente fácilmente soldables mediante EBW. El haz de electrones de alta energía permite soldar el cobre sin necesidad de precalentar la unión hasta profundidades de 50 mm de una sola pasada.

Los metales con alto punto de fusión también son soldables por haz de electrones gracias a la potencia del haz. Debido a las condiciones de vacío inherentes al proceso de soldadura por haz de electrones, es posible soldar metales reactivos como el titanio sin oxidación, precipitación de carburos o problemas de fragilización por hidrógeno. Por estos motivos, la industria aeronáutica se ha decantado para piezas de seguridad crítica por la soldadura por haz de electrones

Zirconio y Niobio son metales de gran aplicación en la industria nuclear y en la fabricación de componentes para aceleradores de altas energías pero que son también capaces de reaccionar con gases residuales, por dicho motivo el proceso de EBW es cada vez más demandado para estas aplicaciones.

Los mismos motivos se aplican para justificar el éxito de la soldadura EBW a metales como el tántalo, iridio, vanadio y sus aleaciones.

La mayoría de los aceros que son adecuados para soldarse por técnicas convencionales de fusión lo son también para soldarse por EBW. En general teniendo en cuenta la mínima zona afectada por el

calor y la ausencia de hidrógeno debida a que el proceso se realiza en vacío durante el proceso de EBW hacen que puedan soldarse la mayoría de estos materiales sin especiales precauciones. El hierro dulce y las aleaciones de hierro que contienen silicio - como las utilizadas en transformadores y motores eléctricos pueden soldarse fácilmente mediante soldadura por haz de electrones.

La ausencia de oxígeno propia del proceso en vacío de la soldadura EBW produce enormes beneficios. En el caso de aceros dúplex y austeníticos con presencia de nitrógeno en sus aleaciones es necesario previamente a la realización de la soldadura efectuar unas pruebas para obtener los parámetros que permitan eliminar el riesgo de formación de poros por desgasificado del nitrógeno especialmente en aceros duplex.

Aceros ferríticos hasta con un 0.2% de contenido en carbono son considerados normalmente como de fácil soldeo. Si contienen mayor cantidad de carbono es necesario realizar un precalentamiento. El níquel puro y las aleaciones de níquel - cobre, así como muchas de las aleaciones níquel-hierro son fácilmente soldables mediante EBW en contraste con la soldadura por arco. El Inconel 617 puede soldarse por EBW con la seguridad de ausencia de grietas por soldadura. Esta es una de las grandísimas ventajas de la soldaduras por haz de electrones - el haz es tan intenso- que permite la unión de metales de distinto punto de fusión y diferentes conductividades térmicas.

Por lo tanto, las posibilidades de aplicación de EBW para AM son elevadas debido a la gran cantidad de materiales que admiten este método, ya que muchos de los materiales mencionados anteriormente no admiten otro tipo de soldadura debido a las grandes distorsiones producidas o a la temida fragilidad por hidrógeno.

Este método necesita ejecutarse en unas condiciones determinadas; las tres opciones disponibles en EBW son las siguientes:

- **Soldadura al alto vacío (SAV):** En la cual la soldadura se realiza en el mismo vacío que se usa para la generación del haz.
- **Soldadura al medio vacío (SMV):** En el cual la operación se ejecuta en una cámara separada, en donde sólo se obtiene un vacío parcial.
- **Soldadura sin vacío (SSV):** es donde el cañón con haz de electrones se aloja en la cámara de vacío duro y hay varias cámaras intermedias de presión reducida entre el cañón y el trabajo, este modo de operación elimina la cámara de vacío para el trabajo.

El primer método desarrollado requiere que la cámara de soldadura esté en un alto vacío, con este método puede soldarse material de grosor de 15 cm (6 in), y la distancia entre la pistola de soldadura y la pieza de trabajo (la distancia de separación) puede ser de hasta 0,7 m (30 in).

El siguiente método es la realización de EBW en un vacío suave, bajo la presión de 0,1 torrs; esto reduce el tiempo necesario para evacuar la cámara, pero reduce la distancia máxima stand-off y disminuye el espesor máximo del material a 5 cm (2 in).

El tercer método de EBW se llama nonvacuum o EBW fuera de vacío, ya que se realiza a presión atmosférica. La distancia de separación debe ser disminuida a 4 cm (1,5 pulgadas), y el espesor máximo del material es de unos 5 cm (2 pulgadas). Sin embargo, permite cualquier tamaño de pieza ya que el tamaño de la cámara no es un factor.

El proceso de EBW necesita de una baja corriente (por lo general menos de 1 A), pero una tensión de hasta 60 kV (máquinas de baja tensión), o 200 kV (máquinas de alta tensión); las máquinas de alta tensión pueden proporcionar una soldadura relación de profundidad a anchura de 25: 1,

mientras que la relación con un equipo de bajo voltaje es de alrededor de 12: 1, sin embargo, la potencia del haz de una fuente de alimentación es un indicador de su capacidad para hacer el trabajo, y determina la densidad de potencia (generalmente 40-4000 kW / cm² o 100-10.000 kW / pulg²).

Para el alto vacío y método de vacío suave, la cámara de soldadura utilizada debe ser hermética y lo suficientemente fuerte, debe tener aberturas para que las piezas se pueden insertar y retirar, y su tamaño debe ser suficiente para mantener las piezas de trabajo, pero no significativamente más grandes, ya que las cámaras más grandes requieren más tiempo para evacuar. La cámara también debe estar equipada con bombas capaces de evacuar a la presión deseada, estas bombas dependen del tipo de cámara a utilizar.

Esta tecnología también presenta otras limitaciones como pueden ser: los elevados costos de equipamiento y materiales básicos para la fabricación aditiva y que se requiere personal especializado y con experiencia.

3.5.2 Estudio del proceso. Pruebas experimentales.

Se prepararon y enviaron probetas de 300x150mm y 10 mm de espesor a una empresa que realiza recargues con Electron Beam. El efecto de los parámetros de soldadura se caracterizó realizando ensayos macroscópicos sobre acero al carbono. Los datos que se muestran a continuación fueron proporcionados por el proveedor.

Los parámetros utilizados en la primera prueba se detallan en la Tabla 12.

Tabla 12. Parámetros de soldadura con EBW Prueba 1.

Velocidad de desplazamiento (mm/s)	Voltaje de aceleración (kV)	Corriente del haz (mA)	Tamaño del enfoque (mm)	Patrón del haz
19	60	19	0,025	Recto

La máquina utilizada por la empresa que realizó las pruebas se muestra en la Figura 112. Se realizaron dos cordones de 130 mm de largo y un ancho de 2,5 mm aproximadamente. Como vemos en la Figura 113, la superficie de la soldadura es regular y el ancho de los cordones se mantiene constante.



Figura 112. Equipo de EBW



Figura 113. Aspecto superficial después de soldar con EBW Prueba 1

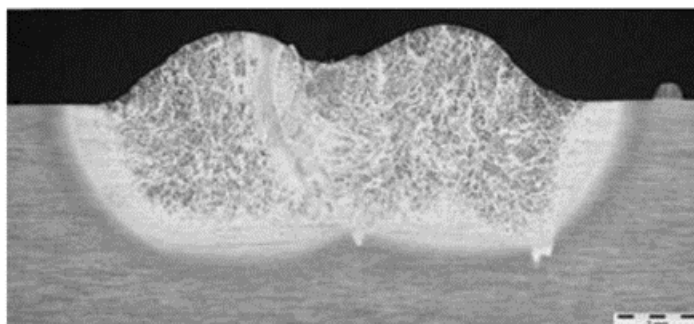


Figura 114. Macrografía prueba 1.

La Figura 114 muestra el examen macrográfico, en el que podemos ver que la prueba se ha realizado con dos cordones y que la extensión de la zona afectada no supera 1,5 mm ya que una de las principales características de EBW, es que la zona afectada térmicamente es limitada.

En la segunda prueba que se realizó, se pretendía realizar un recrecimiento sobre una chapa. En este caso, para mejorar la productividad se aumentó la velocidad de soldadura.



Figura 115. Aspecto superficial después de realizar la soldadura (Prueba 2).

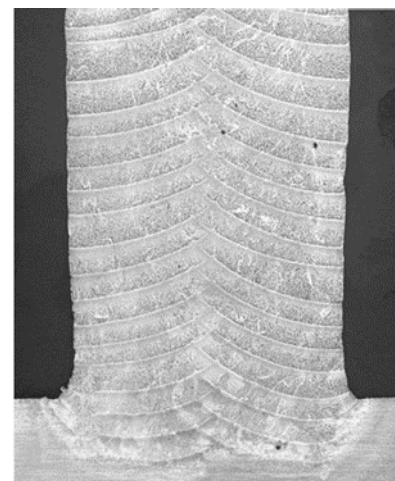


Figura 116. Macrografía prueba 2.

Tabla 13. Parámetros con EBW Prueba 2.

Velocidad de desplazamiento (mm/s)	Voltaje de aceleración (kV)	Corriente del haz (mA)	Tamaño del enfoque (mm)	Patrón del haz
25	60	19,6	0,025	Recto

En la Figura 115 muestra el recrecimiento realizado con EBW de 250 mm de largo y una altura de 60mm. El aspecto superficial del recrecimiento presenta buen aspecto y el ancho se mantiene

constante a lo largo de toda la longitud en una altura de 4,5 cm. La parte superficial no presenta tan buena continuidad, esto puede ser debido a la acumulación de calor.

En la Figura 116 se muestra el examen macrográfico, en el que se puede observar un menor espesor de las capas en relación con la prueba 1. En la zona de la pared en contacto con la chapa se observa buena penetración y una ZAT reducida. Los defectos que se pueden distinguir en la macrografía son poros, pero están dentro de los criterios aceptables de acuerdo con la UNE-EN ISO 5817:2014.

Se realizaron 4 pruebas de parámetros de soldadura, en los que se muestran los parámetros definitivos que fueron facilitados por el proveedor.

Tabla 14. Parámetros definitivos de soldadura EBW.

Velocidad de desplazamiento (mm/s)	Voltaje de aceleración (kV)	Corriente del haz (mA)	Patrón del haz
9,7	60	24	Recto

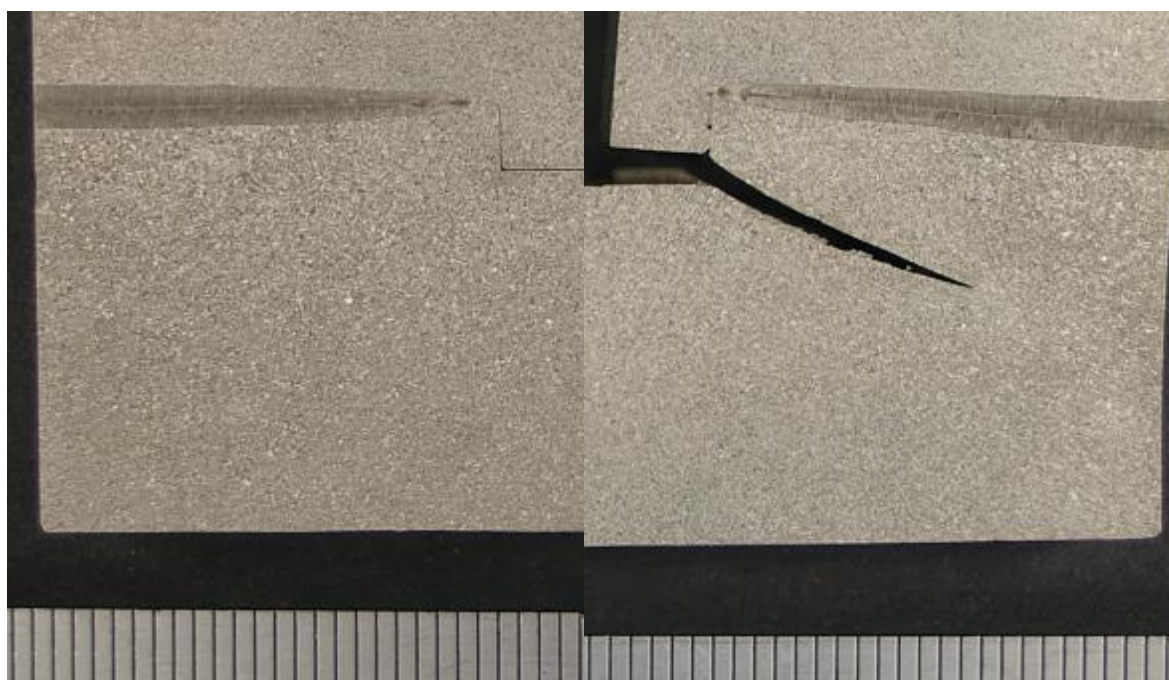


Figura 117. Soldadura EBW Prueba 3.

Figura 118. Soldadura EBW Prueba 4.

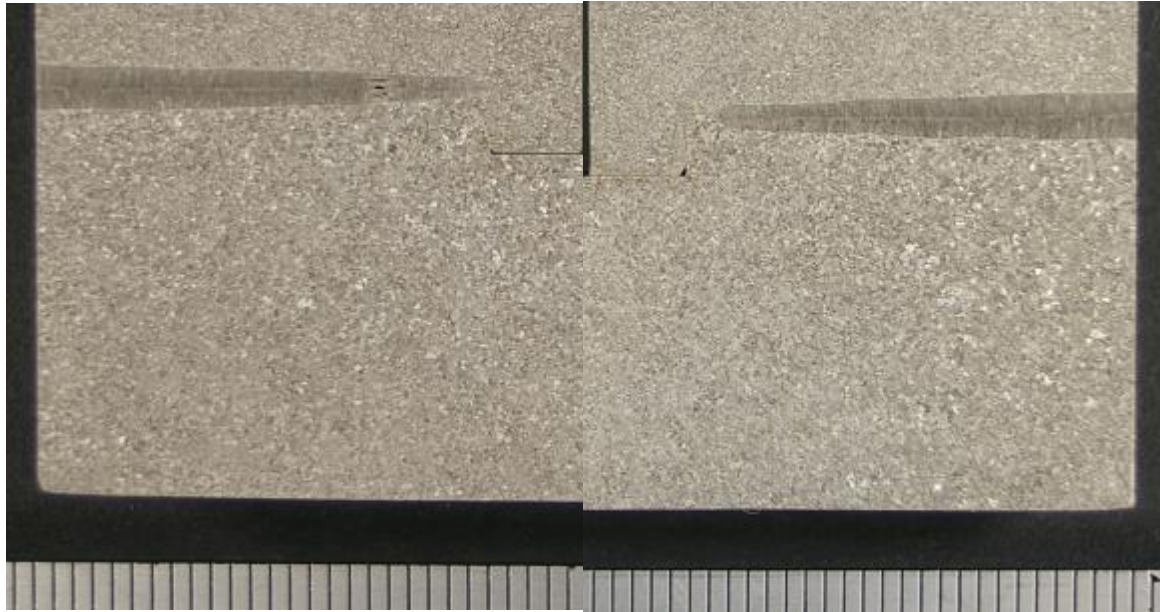


Figura 119. Soldadura EBW Prueba 5.

Figura 120. Soldadura EBW Prueba 6.

En los exámenes macrográficos realizados no se aprecia zona afectada térmicamente en ninguno de los casos. Las 4 soldaduras presentan un buen estado, excepto en las Figura 117 y Figura 119 que se observan defectos en la soldadura, pero que no inducen a agrietamiento. La única grieta que se observa no surge por la soldadura, ni como consecuencia de ella.

Las dos pruebas realizadas para las pruebas de fabricación aditiva con EBW, presentan buenos resultados. En la prueba 2 se ven mejores resultados, ya que las pasadas se han realizado más finas y se puede ver una menor influencia del calor, debido a la reducida zona afectada térmicamente que se obtiene. Respecto a las soldaduras realizadas con EBW, como se observa en las macrografías, la ZAT observada es muy pequeña.