

## PROGRAMA ASTURIAS 2018-2020

### TÍTULO DEL PROYECTO:

Desarrollo para la manufactura digital de grandes piezas mediante la fabricación aditiva por arco (WAAM)

REFERENCIA Nº: IDI/2018/000047

### Entidad Beneficiaria:

Fundación IDONIAL (CIF G33914557)



---

Investigador responsable: ITZIAR MINONDO SÁNCHEZ

# ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN .....	3
2	OBJETIVOS Y GRADO DE CUMPLIMIENTO .....	3
3	DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LOS TRABAJOS REALIZADOS .....	5
	HITO 1. FABRICACIÓN DE DEMOSTRADORES DE GRAN TAMAÑO.....	6
	Tarea 1. Fabricación de demostradores de aluminio (AlSi5) .....	6
	Tarea 2. Fabricación de demostradores de acero inoxidable (316L).....	17
	Tarea 3. Fabricación de demostradores de Inconel (625 y 718) .....	21
	HITO 2. DISEÑO DE PROTOTIPO A ESCALA REDUCIDA DE CÁMARA DE BAJO VACÍO. DEMOSTRADORES EN TITANIO.....	25
	Tarea 1. Diseño de prototipo a escala reducida de cámara de bajo vacío .....	25
	Tarea 2. Fabricación de demostrador en Titanio .....	33
	HITO 3. MEJORA DE PROPIEDADES MECÁNICAS (MEDIANTE ROLLING) Y ACABADO SUPERFICIAL (MEDIANTE REFUSIÓN).....	39
	Tarea 1. Diseño de prototipo a escala reducida de microlaminador .....	39
	Tarea 2. Pruebas de las propiedades mecánicas mediante Rolling .....	55
	Tarea 3. Pruebas de mejora del acabado superficial .....	63
	HITO 4. DESARROLLO DE PROTOTIPO DE SISTEMA DE INSPECCIÓN EN LÍNEA POR TERMOGRAFÍA. PRUEBAS INICIALES CON ESPECTROMETRÍA ACÚSTICA.....	67
	Tarea 1. Desarrollo del prototipo de sistema de inspección en línea por termografía.....	68
	Tarea 2. Desarrollo de sistema de control en línea por parámetros eléctricos .....	86
	Tarea 3. Estudio de viabilidad del control del proceso mediante espectrometría acústica .....	91
	HITO 5. FABRICACIÓN DE DEMOSTRADORES DE LATTICES MEDIANTE MÉTODOS AVANZADOS DE SOLDEO.....	106
	Tarea 1. Fabricación de demostradores de peso reducido (lattices) .....	106
	Tarea 2. Caracterización mecánica avanzada. Ensayos de impacto.....	111
	HITO 6. DISEÑO DE PROCEDIMIENTO DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y CERTIFICACIÓN DEL PRODUCTO FABRICADO MEDIANTE WAAM DE ACUERDO CON LA NORMA APLICABLE (UNE EN ISO 17296-3).....	124
	Tarea 1. Diseño de procedimiento de caracterización mecánica.....	124
	Tarea 2. Certificación del producto fabricado mediante WAAM de acuerdo con la norma.....	128
4	CONCLUSIONES.....	136

## 1 INTRODUCCIÓN

La tecnología WAAM (Wire arc additive manufacturing) es una tecnología de fabricación aditiva basada la soldadura, utiliza un arco eléctrico para fundir un alambre de metal y depositar material sobre una superficie. El conjunto está montado y controlado sobre un brazo robótico.

Esta tecnología es la más prometedora para la fabricación de grandes piezas metálicas y designa un grupo de técnicas utilizadas para construir componentes tridimensionales directamente a partir de datos de diseño asistido por ordenador (CAD) mediante una estrategia aditiva basada en la deposición de capas sucesivas con un hilo como material de aporte. Los fabricantes están cada vez más interesados en este tipo de métodos de fabricación, ya que permite reducir plazos y costes.

La automatización está cada vez más implantada en los procesos de fabricación, en concreto en la soldadura. Mediante softwares de simulación se pueden generar las trayectorias a seguir por el robot para la fabricación de la pieza. En el caso de estudio, el proceso WAAM, la simulación permitirá determinar alcances, detectar si se producen colisiones e identificará áreas dónde los ángulos de deposición podrían ser difíciles de lograr. Con dicha simulación se genera el programa a cargar en el robot de la planta piloto de Fundación Idonial, permitiendo la automatización completa del proceso.

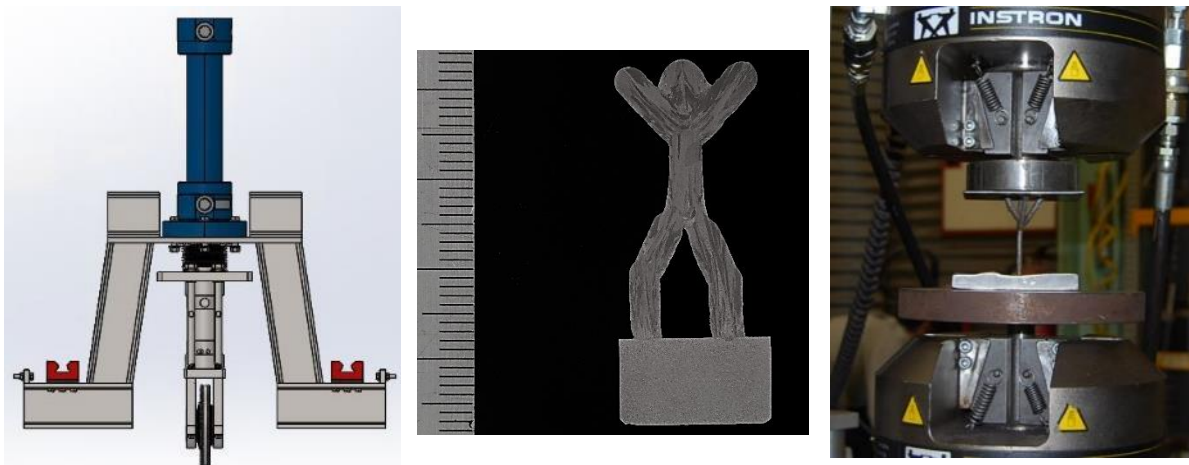


Figura 1. Sistema de laminación, celda unitaria tipo lattice y ensayo de una celda unitaria tipo lattice

## 2 OBJETIVOS Y GRADO DE CUMPLIMIENTO

El objetivo principal del proyecto se centraba en la exploración la fabricación aditiva por soldadura (Wire Arc Additive manufacturing) para la aplicación de dicho proceso a los sectores industriales existentes en la región.

Con el presente proyecto se ha consolidado la línea de actividad de fabricación aditiva por arco en IDONIAL generando conocimientos y experiencias con varios materiales, construyendo prototipos (cámara de vacío y dispositivo de micro-laminación) y desarrollando nuevas tecnologías complementarias (micro-laminación o “rolling” e inspección en línea) que pueden ser explotadas en un futuro muy cercano en la región.

Los objetivos específicos del proyecto y su grado de cumplimiento al final se detallan a continuación:

**1. Obtención de demostradores de WAAM. Piezas de geometría compleja en acero inoxidable, aluminio e Inconel.**

Se han realizado varios demostradores:

- En aluminio: un rodete con geometría compleja y espesor variable y una pieza recta para caracterizar las propiedades mecánicas.
- En inconel: una brida de geometría compleja, con paredes inclinadas geometría y espesor variable y una pieza recta para caracterizar las propiedades mecánicas

**2. Diseño de una cámara de bajo vacío y desarrollo de un procedimiento de fabricación mediante WAAM de piezas de Titanio.**

Se ha construido una cámara de atmosfera protectora de 2500x1000x1500mm de capacidad y se ha probado consiguiendo una atmosfera con menos 1200 ppm de contenido de oxígeno tal como exige la AMS 4999™ REV. A (Titanium Alloy Direct Deposited Products 6Al - 4V Annealed).

**3. Mejora de las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas por WAAM mediante el diseño de un micro-laminador.**

Se han realizado pruebas con varios materiales:

- En acero inoxidable: Se han realizado cupones en AISI 316L obtenido mejoras en las propiedades mecánicas.
- En titanio: Se han realizado cupones en Ti-6Al-4V.

**4. Investigación y desarrollo de tres métodos de detección de defectología en línea: termografía, por parámetros eléctricos y mediante espectrometría acústica.**

Se han validado los tres métodos de forma satisfactoria.

**5. Análisis de la fabricación y la aplicabilidad de estructuras de alta resistencia y bajo peso, tipo lattices.**

Se han fabricado dos tipos de celda unitaria que han sido ensayadas obteniendo una elevada resistencia a la compresión. Adicionalmente se han fabricado dos probetas representativas de una estructura aligerada que también han sido ensayadas.

**6. Diseño de un procedimiento de certificación de productos fabricados mediante WAAM.**

Se ha estudiado toda la normativa existente, europea y americana, incluso de sectores tan exigentes como el aeroespacial (AMS: Aerospace Material Specification).

### **3 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LOS TRABAJOS REALIZADOS**

La planificación general del presente proyecto se ha estructurado en los siguientes hitos y tareas:

**H1: FABRICACIÓN DE DEMOSTRACIONES DE GRAN TAMAÑO.**

T1.1. Fabricación de demostradores de aluminio (AlSi5).

T1.2. Fabricación de demostradores de aceros inoxidable (316L).

T1.3. Fabricación de demostradores de Inconel (625 y 718).

**H2: DISEÑO DE PROTOTIPO A ESCALA REDUCIDA DE CÁMARA DE BAJO VACÍO DEMOSTRACIONES EN TITANIO.**

T2.1. Diseño de prototipo a escala reducida de cámara de bajo vacío.

T2.2. Fabricación de demostrador en Titanio.

**H3: MEJORA DE PROPIEDADES MECÁNICAS (MEDIANTE ROLLING) Y ACABADO SUPERFICIAL (MEDIANTE REFUSIÓN).**

T3.1. Diseño prototipo a escala reducida de micro-laminador.

T3.2. Pruebas de mejora de las propiedades mecánicas mediante Rolling.

T3.3. Pruebas de mejora de acabado superficial.

**H4: DESARROLLO DE PROTOTIPO DE SISTEMA DE INSPECCIÓN EN LÍNEA POR TERMOGRAFÍA. PRUEBAS INICIALES CON ESPECTOMETRÍA ACÚSTICA.**

T4.1. Desarrollo de prototipo de sistema de inspección en línea por termografía.

T4.2. Desarrollo de sistema de control en línea por parámetros eléctricos.

T4.3. Estudio de viabilidad del control del proceso mediante espectrometría acústica.

**H5: FABRICACIÓN DE DEMOSTRACIONES DE LATTICES MEDIANTE MÉTODOS AVANZADOS DE SOLDEO.**

T5.1. Fabricación de demostradores de peso reducido (lattices).

T5.2. Caracterización mecánica avanzada. Ensayos de impacto.

**H6: DISEÑO DE PROCEDIMIENTO DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y CERTIFICACIÓN DEL PRODUCTO FABRICADO MEDIANTE WAAM DE ACUERDO CON LA NORMA APLICABLE (UNE EN ISO 17296-3)**

T6.1. Diseño de procedimiento de caracterización mecánica.

T6.2. Certificación de producto fabricado mediante WAAM de acuerdo con la norma.

A continuación, se describen detalladamente las actividades desarrolladas en cada uno de los hitos enumerados previamente.

## HITO 1. FABRICACIÓN DE DEMOSTRADORES DE GRAN TAMAÑO

Partiendo de los resultados obtenidos en el proyecto previo Additive Welding, financiado en la convocatoria de Programa Asturias 2016-2017, el objetivo de este hito es el perfeccionamiento de las técnicas de fabricación mediante WAAM en piezas de grandes dimensiones, con geometrías más complejas y con materiales como el acero inoxidable, aceros base níquel y aluminio.

El primer paso ha sido la selección del proceso de soldado más adecuado. En la Figura 2 se muestran todos los procesos de los que Fundación Idonial dispone a día de hoy para WAAM.

Tal como se mencionó en la propuesta, dentro de las distintas opciones, en el presente proyecto se han estudiado el TIG (o GTAW) y la semiautomática (GMAW o MIG/MAG, según se use gas inactivo o activo como medio de protección), y en este último caso un subproceso registrado por Fronius como CMT (Cold Metal Transfer), dando preferencia, siempre que ha sido posible, a la tecnología diseñada por Fronius (CMT) por su mayor productividad.

El CMT es una variante de MIG con un modo de transferencia optimizado, que permite un mejor control del baño de soldadura, mejorando la calidad y produciendo un menor número de salpicaduras.

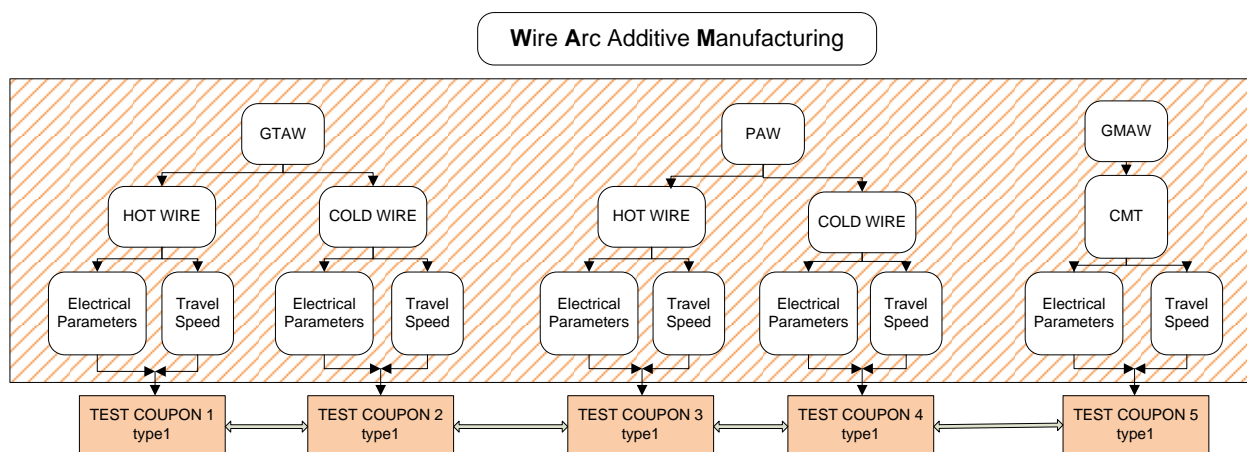


Figura 2. Diseño de experimentos para la selección del proceso de soldado

### Tarea 1. Fabricación de demostradores de aluminio (AlSi5)

Tras las pruebas en aluminio realizadas con TIG y documentadas en la anualidad 2018, en las que se tuvieron problemas de porosidad (véase Figura 3; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), en la anualidad 2019 se trabajaron posibles campos de mejora en este aspecto. Se probó el uso del CMT, pero el problema de la porosidad siguió apareciendo. Dado que la conductividad térmica del aluminio es muy elevada, la velocidad de solidificación es relativamente alta y por consiguiente, las burbujas de gas a menudo no pueden subir a la superficie del baño. Las rebasa el frente de solidificación y quedan atrapadas entre los granos, formando poros.

Para la ejecución de esta tarea se utilizaron dos robots HP20D-6 de Yaskawa Motoman, una máquina GMAW, CMT advance y una máquina de GTAW MagicWave 5000, ambas de FRONIUS® (véase Figura 4) y algunos equipos auxiliares necesarios como posicionadores y viradores.

Las pruebas fueron realizadas con el consumible AlSi5 de Böhler de 1 mm de diámetro. El gas de protección que utilizado ha sido el argón (99,99%).

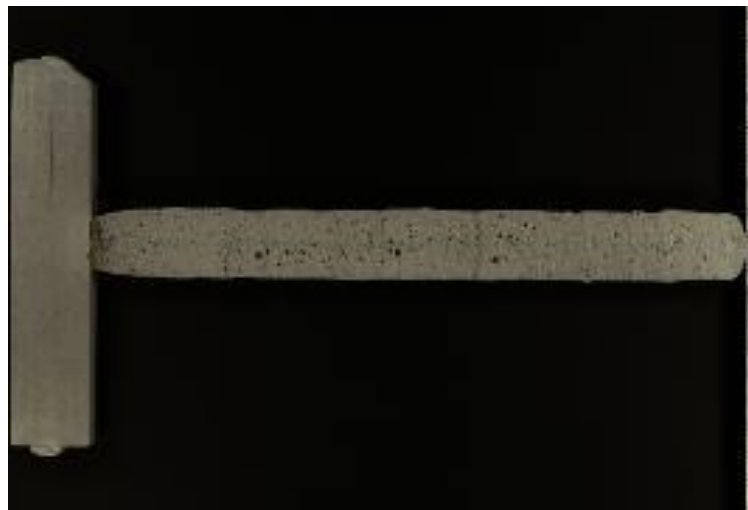


Figura 3. Macrografía de la probeta PV1901330-1

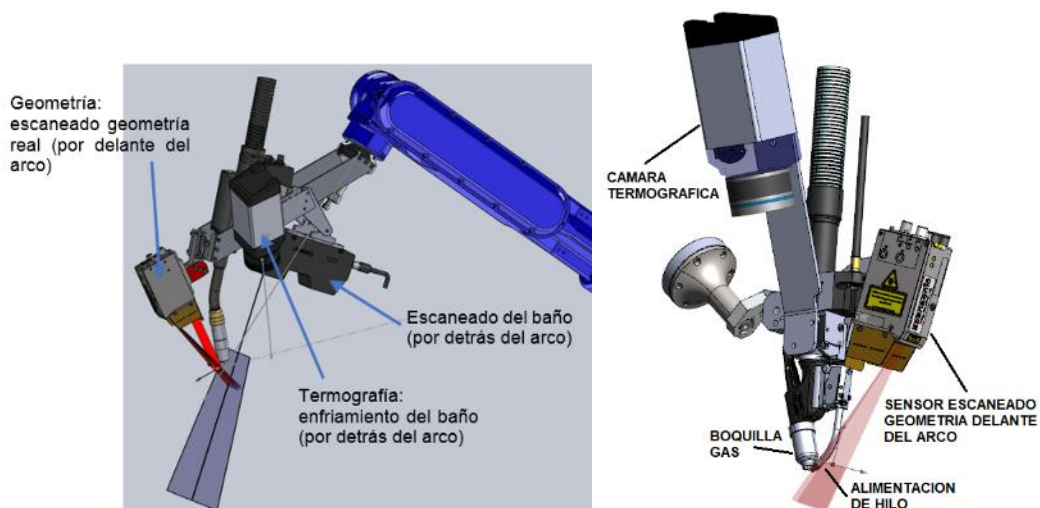


Figura 4. Cabezales usados para la soldadura. Izquierda: GMAW. Derecha: GTAW

En el proceso de formación de poros durante la soldadura de aluminio puede distinguirse dos tipos de mecanismos, uno de origen mecánico y otro metalúrgico en función del proceso de formación en el metal depositado. Los poros de origen mecánico se deben a la encapsulación de gases por motivos estructurales, que dada la geometría de los cordones de la pared quedan totalmente descartados en esta aplicación.

Se ha abordado la formación de poros de origen metalúrgico, esto es, los provocados por el distinto grado de solubilidad de los gases en los metales en las fases sólida y líquida. Los poros aparecidos (Figura 3) se deben, principalmente, a los gases que llegan disueltos a la fase líquida (baño de soldadura) y que quedan atrapados durante la transición de la fase líquida a la fase sólida. Las posibles causas (fuentes de hidrógeno) serían:

- Presencia de aceite y grasa en la chapa base
- Presencia de hidrógeno en el consumible
- La humedad (películas de óxido o condensación de vapor de agua en la superficie de la chapa o del consumible)
- Presencia de aire en la zona de soldadura (debido a una posición o diseño erróneo de la boquilla, turbulencias en el flujo de gas de protección, a roturas en el sistema de suministro de gas, etc.).

Las medidas analizadas y las soluciones adoptadas para evitar la porosidad aparecida han sido:

- 1) Definición de un proceso de limpieza, incluyendo un decapado, para el material base.
- 2) La limpieza y el precalentamiento del consumible con el fin de evitar la presencia de suciedad así como humedad en el hilo. La condensación se produce cuando el metal de base está más frío que la temperatura ambiente. Por tanto se estableció un precalentamiento sistemático del material de base tras su limpieza con el fin de alcanzar una temperatura ligeramente superior a la temperatura ambiente antes de proceder a la soldadura.
- 3) La limpieza del todo el sistema de alimentación de hilo y la instalación de sirgas, puntas de contacto, boquillas y demás consumibles para el hilo, nuevos en cada uso.
- 4) Limpieza y reposición de elementos en el sistema de alimentación del gas de protección (filtros, manómetro y mangueras nuevas y boquilla, la suciedad o proyecciones depositadas en la boquilla de gas pueden provocar turbulencias en el flujo)
- 5) Mejoras en el sistema de protección por gas. Incremento del caudal y el flujo sí como modificación la geometría de la tobera para mejorar la distribución y evitar turbulencias.

De cara a poder fabricar demostradores con paredes de distintos espesores y libres de poros (defectos en general) se realizaron varios cupones de pruebas de parámetros para distintos espesores y tamaños de cordón, cada uno de los cuales fue cortado con el fin de poder analizar tanto la defectología interna como la microestructura. Ver Figura 5, Figura 6 y Figura 7.

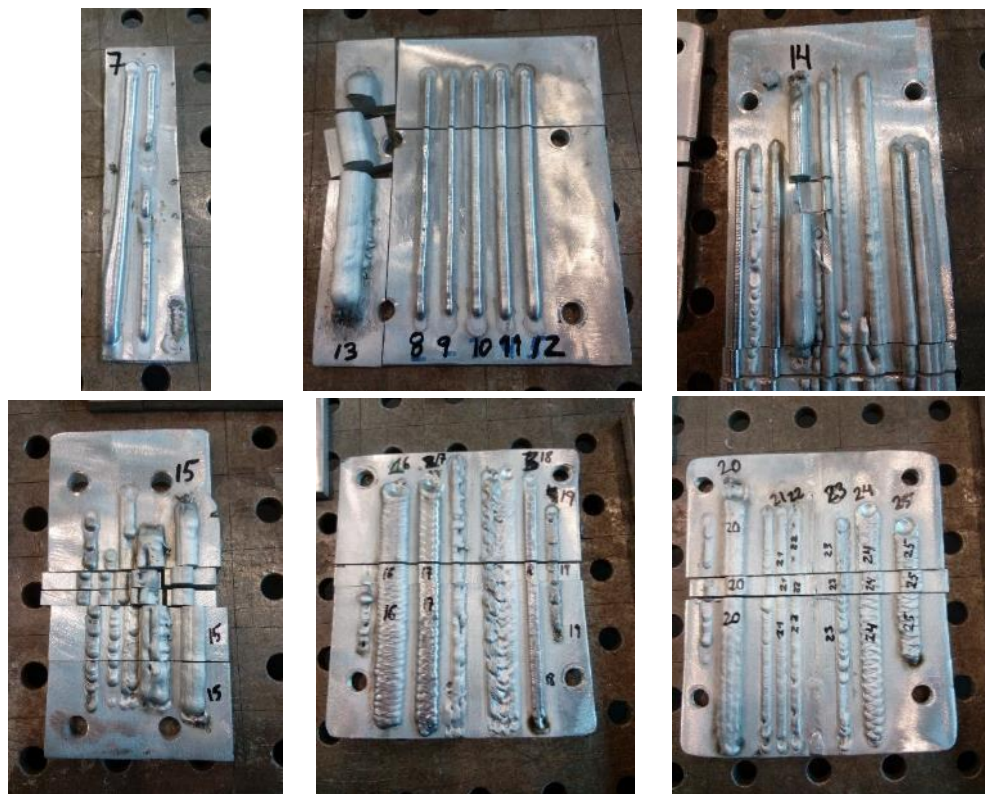


Figura 5. Pruebas de parámetros realizadas

Tal como se observa en la Figura 6, la disminución de defectología fue progresiva a medida que se afinaban los parámetros.

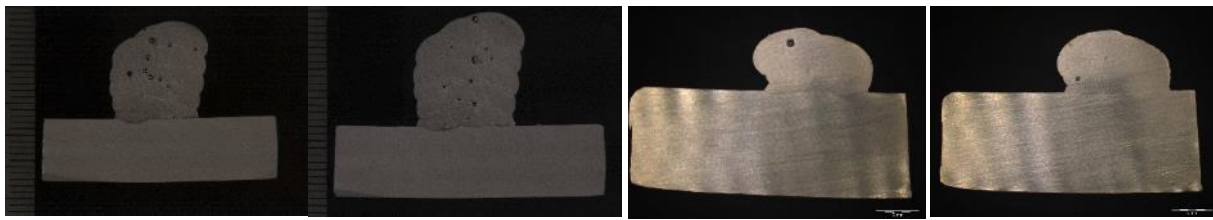


Figura 6. Evolución de la porosidad en las pruebas

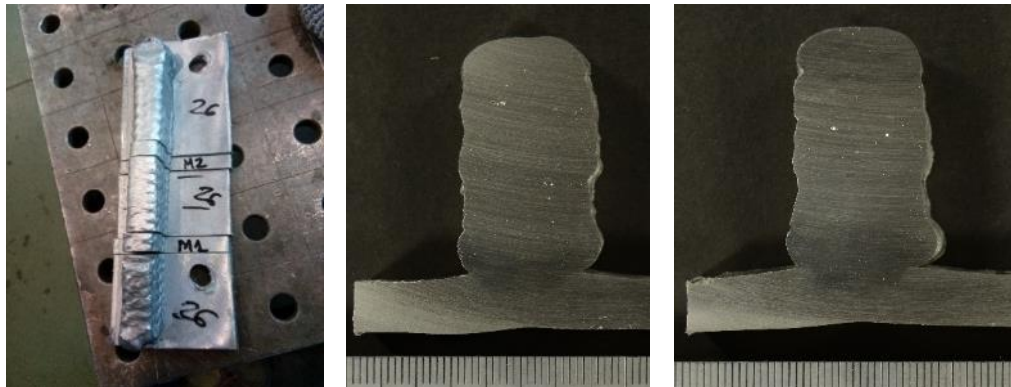


Figura 7. Cupón correspondiente a los parámetros seleccionados

Tal como se ha comentado, para obtener una pared uniforme (necesaria para la posterior extracción de probetas para ensayos mecánicos) y un buen acabado, el aporte térmico ha sido controlado en todas las pruebas para evitar un exceso de acumulación de calor (véase Figura 8).



Figura 8. Registro de temperaturas con 4 termopares en cada prueba

El primer paso, después de la selección de los parámetros ha sido generar mediante Mastercam las trayectorias, cargarlas en RobotMaster para comprobar que no se produzcan colisiones y por último cargar en el Robot de la celda de Fundación Idonial.

Las dimensiones de la pared así como la localización de las probetas se muestran en la Figura 10.

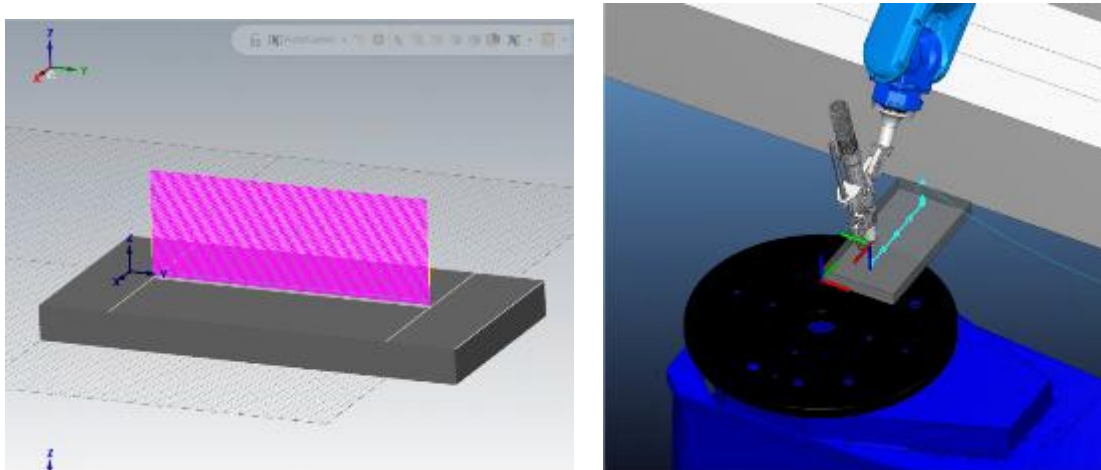


Figura 9. Simulación de la pared de Aluminio sobre sustrato recto. Izq, Generación de trayectorias MasterCam. Drcha, Reproducción de la simulación mediante RoboMaster.

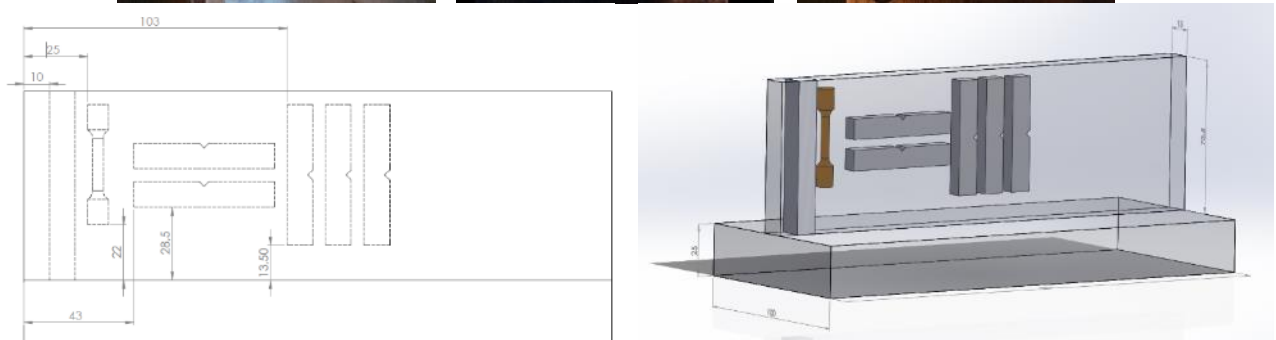
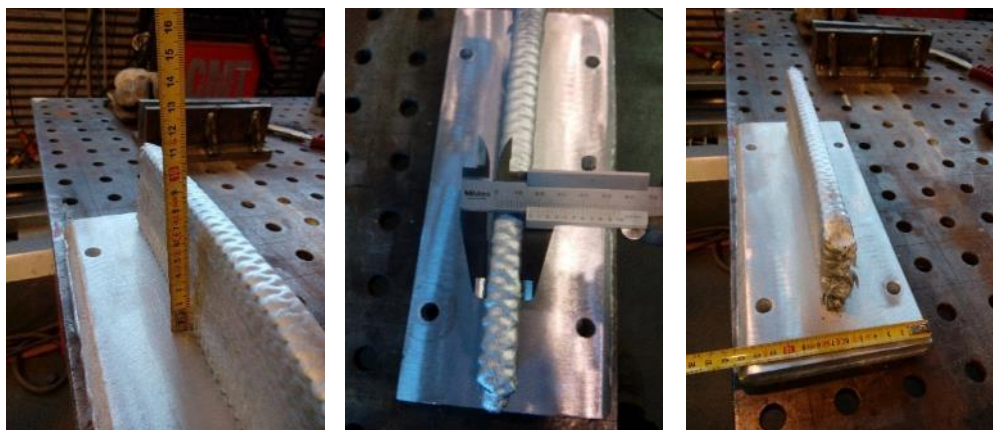


Figura 10. Pared soldada con AISI5 para la extracción de probetas de ensayos mecánicos.

Una vez finalizada la pared se ha procedido a su caracterización según normativa europea. En primer lugar se han realizado los ensayos no destructivos: la inspección visual, el ensayo de líquidos penetrantes así como una inspección radiográfica (cuyos resultados se muestran en la

Una vez superados todos los ensayos no destructivos realizados se procedió a la extracción y el mecanizado de las probetas para los ensayos destructivos: ensayo de tracción según UNE-EN ISO 6892-1 con extensómetro (para determinar límite elástico) con probeta cilíndrica vertical de dimensiones reducidas ( $d=5\text{mm}$ ,  $L_0=25\text{mm}$ ,  $L_c=28\text{mm}$  y  $R_{\text{aprox.}}=5\text{mm}$ ), ensayos de tenacidad en un péndulo de Charpy (de impacto según UNE-EN ISO 148-1) con probetas de  $10 \times 10 \times 55\text{ mm}$  con la

entalla horizontal y con la entalla vertical. Los resultados de los ensayos destructivos se muestran en la Figura 12 y Figura 13.

Arplus <sup>+</sup> norcontrol		INFORME DE ENSAYO RADIOGRÁFICO										HOJA 1 de 1						
CLIENTE CUSTOMER										IDONIAL		N° INFORME: REPORT N°		19/30100420-01-RX				
PROYECTO PROJECT					PR-00587					MATERIAL MATERIAL		AIS15						
PROCEDIMIENTO DE A+ NORCONTROL APPLUS NORCONTROL PROCEDURE					CRITERIO DE ACEPTACION ACCEPTANCE CRITERIA					OTRAS ESPECIFICACIONES OTHER SPECIFICATION								
C2334 001 Rev.11					8 - ASME VIII													
TIPO RADIACION RADIATION SOURCE		R. GAMMA		FUENTE SOURCE		IR-192		EQUIPO N° EQUIPMENT		SERIE N° D5219		ACTIVIDAD Ci		12		CURIOS		
TAM. FOCO FOCUS SIZE		2,7 x 1,12		TENSION kV TENSION		N/A		INTENSIDAD mA INTENSITY mA		N/A		TRAT. TERMICO HEAT TREATMENT		N/A				
PROCESO SOLDEO WELDING PROCESS		N/A		GEOMETRIA JUNTA GROOVE DESIGN		N/A		TIEMPO EXPOSIC. EXPOSURE TIME		11' 32"								
ICI TIPO IQI TYPE		ASTM 1 B. (E 747-04)		MATERIAL MATERIAL		ALUMINIO		TECNICA RX TECHNIQUE		SIMPLE PARED								
PELICULA / FILM																		
PELICULA MARCA FILM MARC		AGFA		SIST. PELIQ. FILM SYSTEM		VACUPAC		TAMANO SIZE		10 x 40		TIPO TYPE		D4				
PANTALLA SCREEN		PLOMO		ESPESOR THICKNESS		0,027 mm		TECN. PELICULA FILM TECH		SIMPLE		PROCESADO PROCESSED		AUTOMATICO				
RESULTADO / RESULTS																		
DENOMINACION UNION DENOMINATION JOINT				ESP. THICKN.	DIST FUENTE PELIC. S.F.D.	DIST OBJETO PELIC. O.F.D.	I.C.I. Req IQI Req N° Req	I.C.I. IQI VISIBLE N°	POSICION POSITION LF / LP	DENSIDAD DENSITY	TIPO DEFECT TYPE	CALIFIC. QUALIFIC A. / N.A.	OBSERVAC. REMARKS					
DIAM. Ø ("") DIAM. Ø *	IDENTIFICACION SOLDADURA DENOMINATION JOINT	SECTOR MARKER	SOLDADOR WELDER	(mm)														
N/A	PV1901330-27	0-1		17	417	17	8	8	LF	3,80	Aa	Accept.						

Figura 11. Informe de ensayos no destructivos (radiográficos) hechos en la pared, cupón 27

Probeta	Ø	Área	Longitud inicial	Ø final	Carga máxima (kN)	Límite elástico 0.2% (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Alargamiento %	Estricción %
1901330-27 2T	4.98	19.4782	25	4.37	2.53	72.41	129.7	13.82	23.00

Figura 12. Resultados obtenidos en los ensayos de tracción realizados a las probetas extraídas del cupón 27

Muestra	1901330 horizontal				1901330 vertical			
Dimensiones (B x W x L) mm	10 x 10 x 55				10 x 10 x 55			
Tipo de entalla	KV2				KV2			
Temperatura ensayo (°C)	23				23			
Probeta	1	2	3	Media	1	2	3	Media
Energía absorbida (J)	15.70	13.90	15.50	15	11.70	13.80	12.60	13
Probeta rota	Si	Si	Si		Si	Si	Si	

Figura 13. Resultados obtenidos en los ensayos de impacto realizados a las probetas extraídas del cupón 27

En la Figura 14 se muestra una comparativa entre los resultados obtenidos en la soldadura de los cupones de aluminio en 2018 y en 2019. En la imagen de la izquierda, cupón soldado con GTAW en 2018, los poros abundantes y de un tamaño incluso superior al 1mm. En la foto de la derecha, anualidad 2019, se aprecia que los poros no han desaparecido pero su tamaño está por debajo de la décima de milímetro salvo tres de ellos que están entorno al medio milímetro.

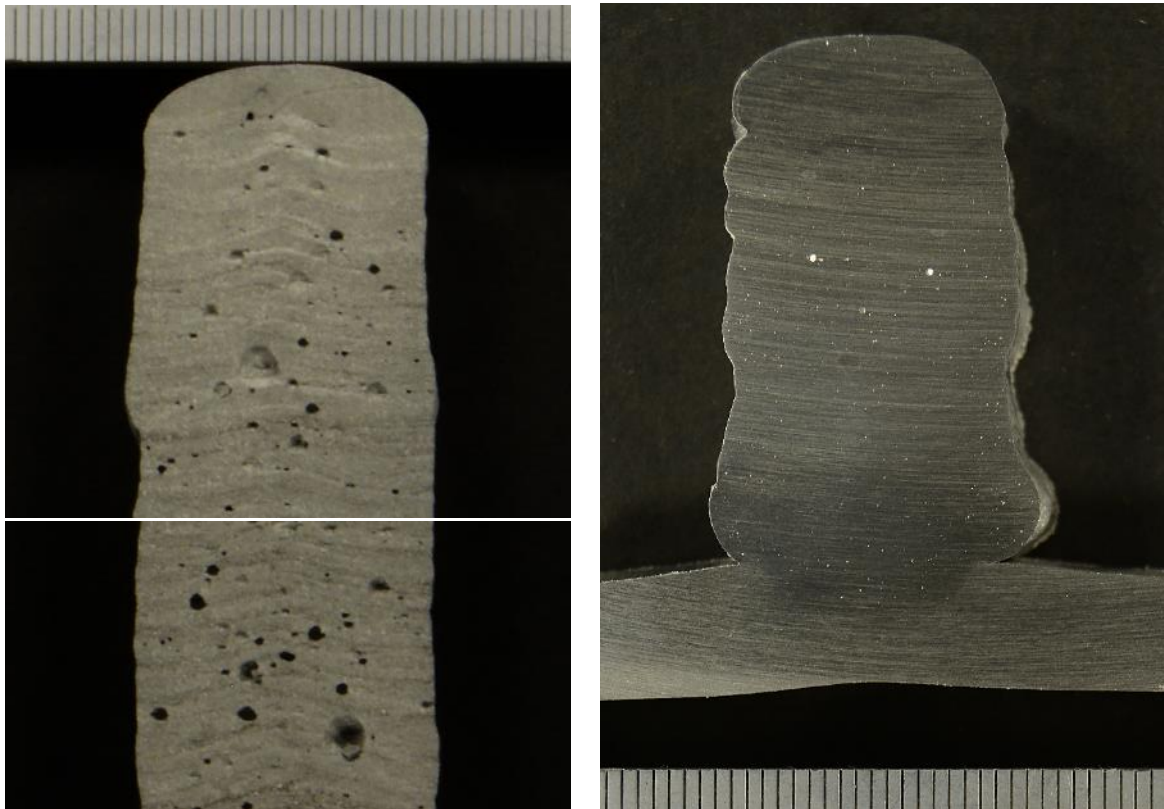


Figura 14. Comparativa de los resultados obtenidos en las pruebas de soldadura de aluminio en la anualidad 2018 y 2019.

### Demostrador de aluminio

Se ha seleccionado una pieza de grandes dimensiones, con geometrías más complejas en la misma aleación de aluminio en la que se han hecho las pruebas previas.

Para dicha prueba se han seguido los pasos mostrados en la Figura 15.

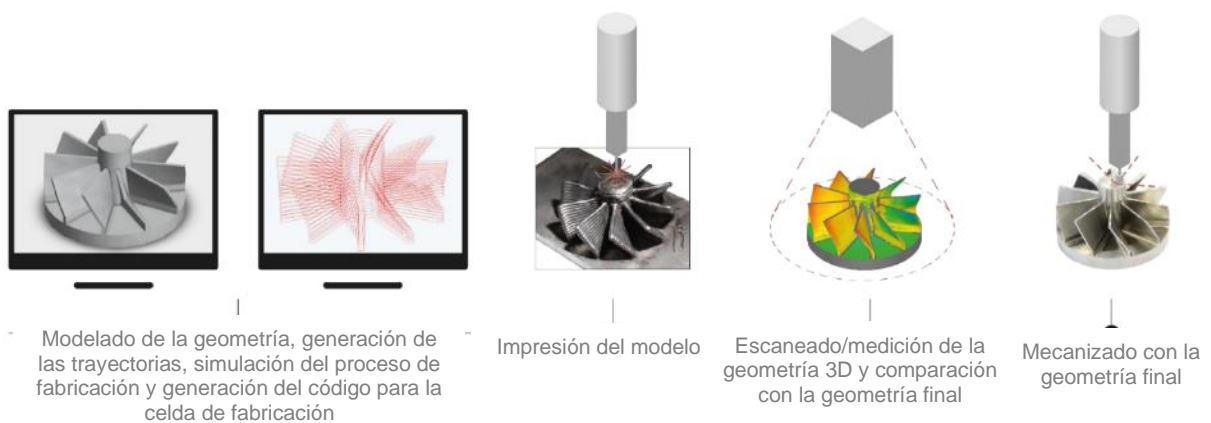


Figura 15. Pasos seguidos para producir una pieza.

1. Modelado 3D de la geometría y simulación de la fabricación (alcances, colisiones, estrategias de fabricación, etc.), tal como se muestra.

La pieza seleccionada ha sido un rodete, en un principio se empezó también a depositar el material correspondiente al tubo central (véase Figura 16), pero en la siguiente versión, aprovechando la ventaja del proceso de fabricación (WAAM) de poder depositar en cualquier posición.

Una de las ventajas de este proceso es la mayor versatilidad. En la fase de modelado de la pieza se ha hecho uso de dicha versatilidad y para la parte central se ha decidido partir de barra o tubo comercial, lo cual reduce enormemente los costes y los tiempos.

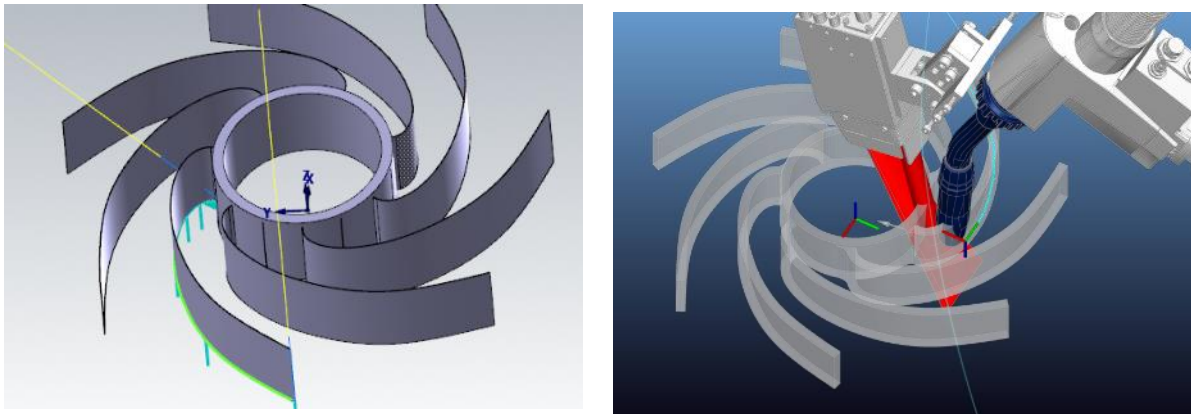


Figura 16. Modelado y simulación de la soldadura del rodete



Figura 17. Cabezal soldadura diseñado para WAAM

2. Monitorizado de la geometría real depositada. Para ello se recurrirá a:
  - a. un escáner situado delante del arco

Lo cual permite:

- Medir y evaluar la capa anterior (una vez ha enfriado) y por tanto el componente, durante la fabricación y prevenir un proceso de fabricación incorrecto
- Analizar las diferencia entre la geometría real y la esperada y por tanto refinar futuros modelos.

En el caso del cupón 2 se detectó la aparición de defectos en la zona de acuerdo con el tubo central, por ello se ha decidido cambiar la zona de acuerdo en el cupón 3. Véase en la Figura 18 derecha la diferencia entre la geometría escaneada y la geometría teórica en la zona de acuerdo para evitar defectos debidos a problemas de mojado.

Ha sido necesaria la modificación de las trayectorias así como volver a hacer la simulación y la generación del programa del robot (Figura 16)

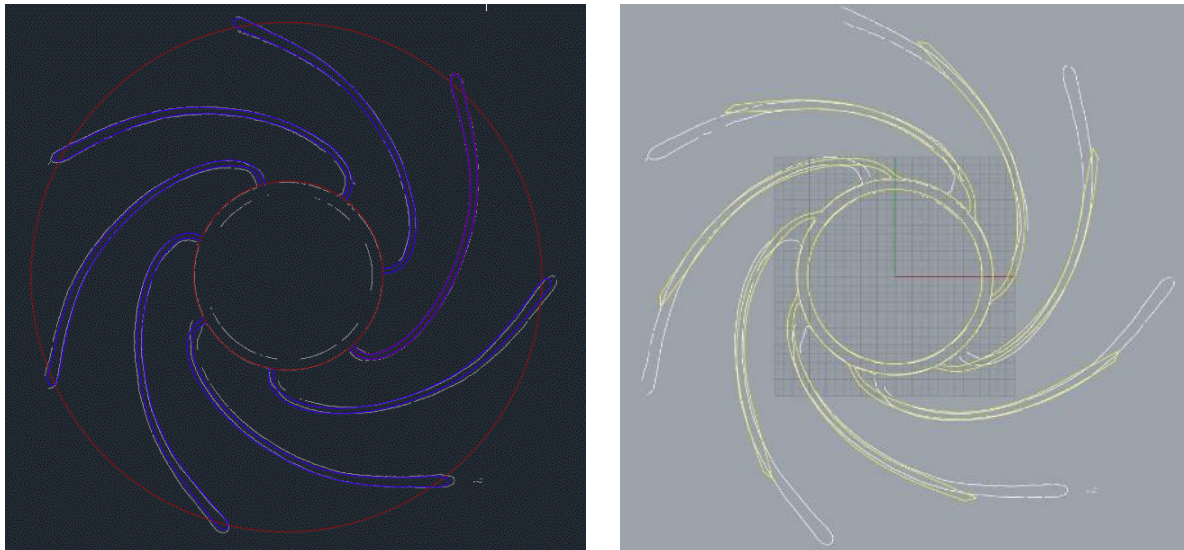


Figura 18. Escaneado de la geometría del primer cordón y comparativa con la geometría teórica. Izqda. cupón 2 con la geometría teórica en azul y la depositada en amarillo. Drcha: cupón 3 con la geometría teórica en blanco y la depositada en amarillo.

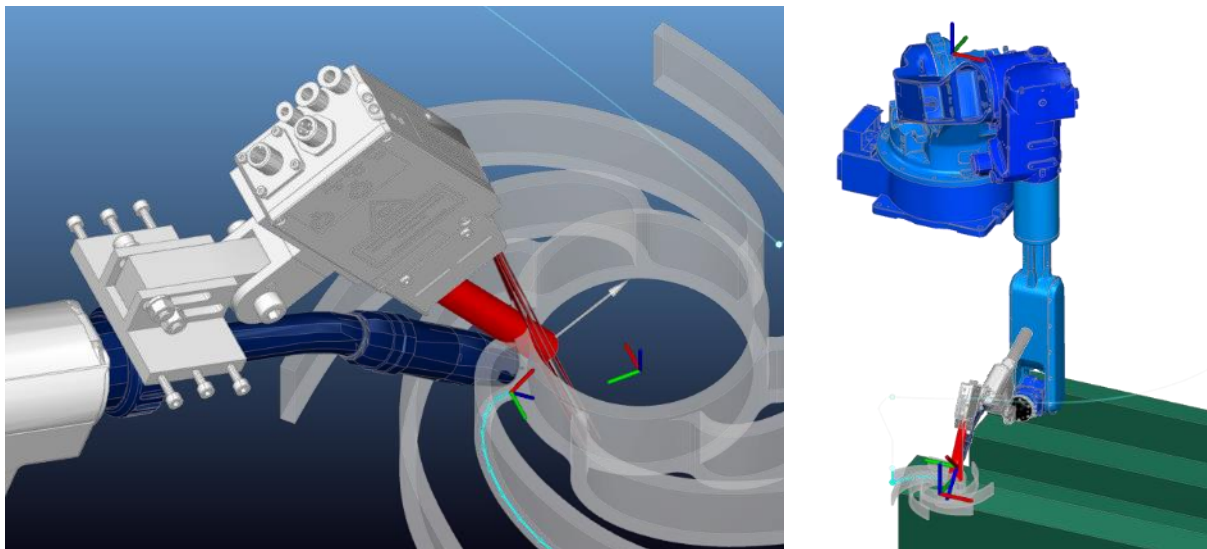


Figura 19. Simulación final de la soldadura del rodete

#### 1. Escaneado de la geometría final para el mecanizado final.

Una vez finalizada la pieza se ha procedido al escaneado de la misma. Para el escaneado de la geometría final se recurrió a un escaneado montado en un brazo de la marca Romer. El ancho del haz de dicho escáner es mucho mayor que el del escáner del cabezal del robot por lo que el tiempo de escaneado se reduce notablemente.

Tal como se observa en la Figura 20, la mayor complejidad de la geometría del rodete, a parte de la zona de empalme con el tubo, es la disminución progresiva del espesor a lo largo del álabe a medida que se acerca al centro (hub).



Figura 20. Rodete de aluminio en condición "as welded"

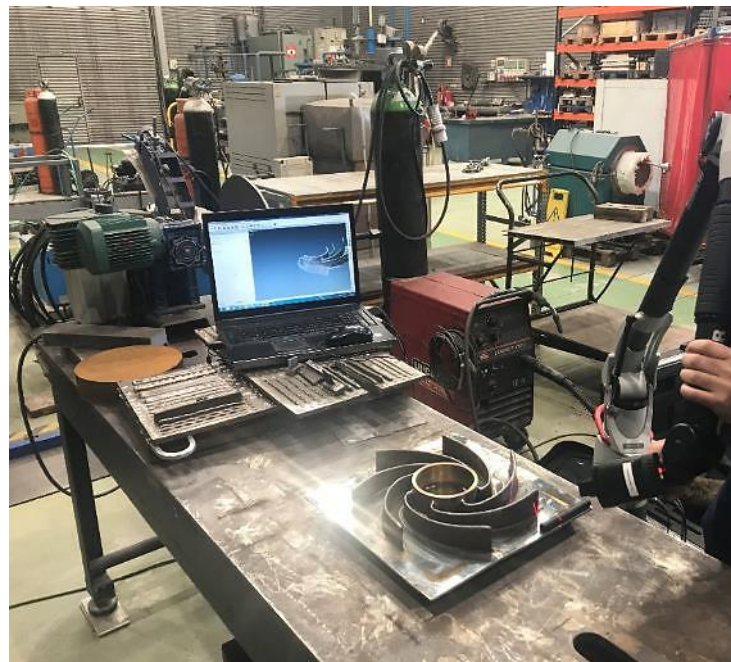


Figura 21. Escaneado del rodete "as welded"

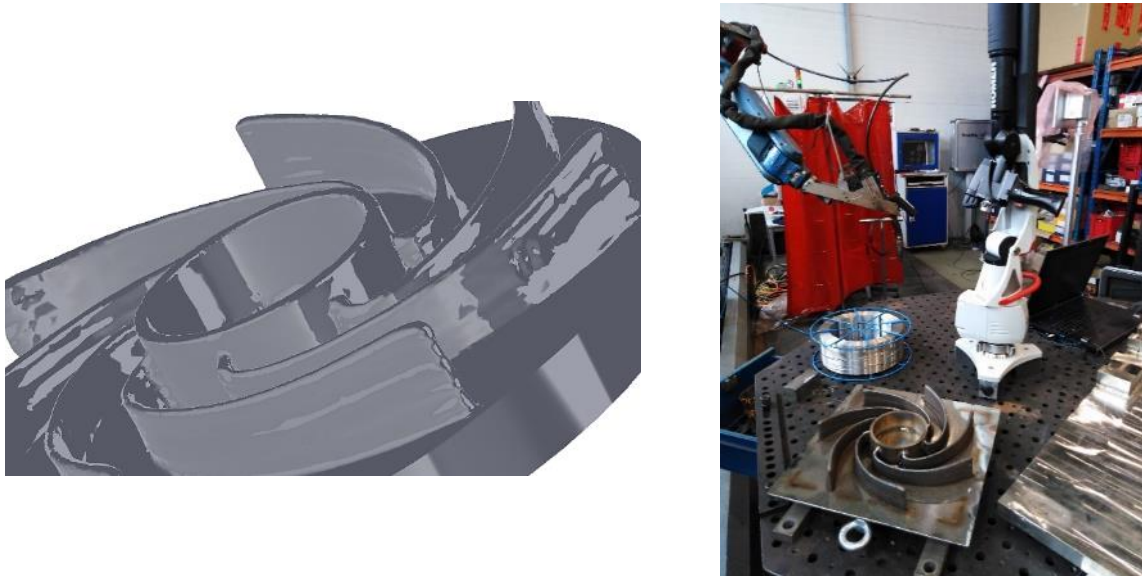


Figura 22. Rodete escaneado

Tal como se muestra en la Figura 23, salvo el tubo central que fue realizado con un tubo unos milímetros más pequeño que lo que figuraba en 3D (por temas de disponibilidad), el resto de la pieza tiene creces de mecanizado esperadas y que van de las décimas a los 2 milímetros.

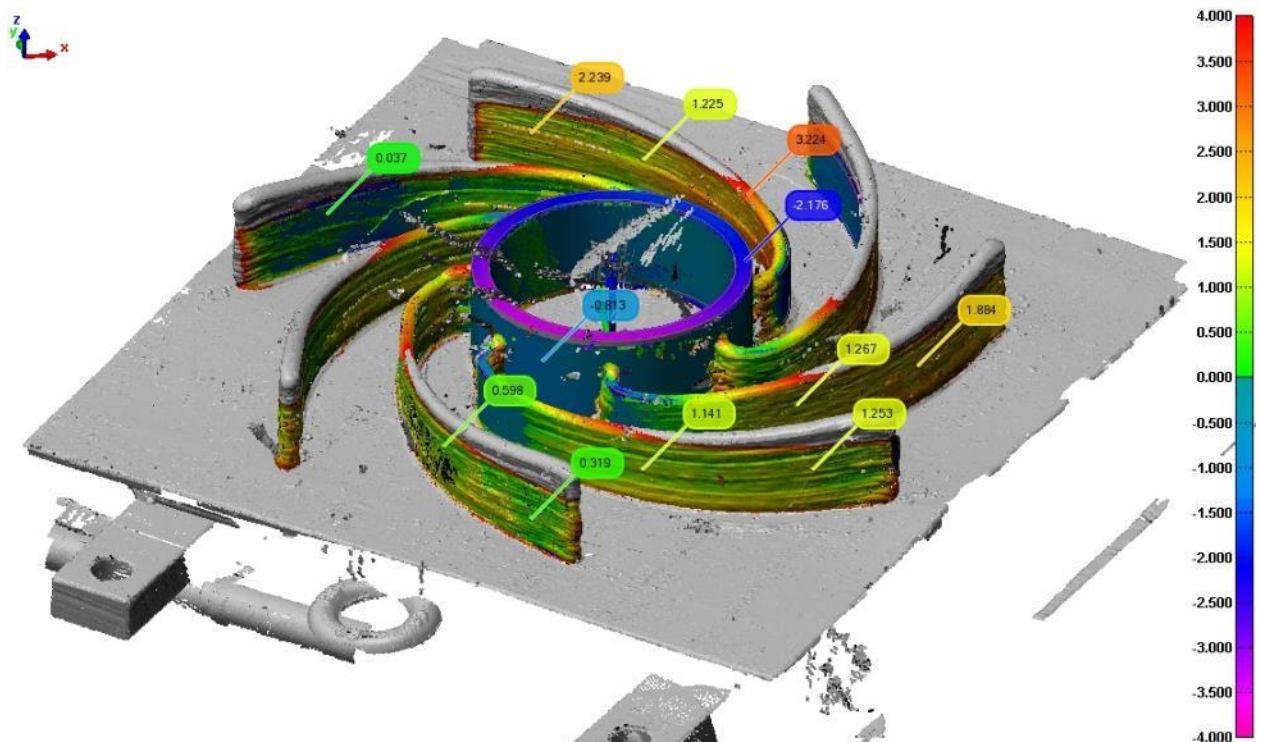


Figura 23. Resultados obtenidos en el escaneo final

## Tarea 2. Fabricación de demostradores de acero inoxidable (316L)

### A. Fabricación de una pared recrecida

Para la realización de esta tarea se partió de los datos obtenidos sobre la pared realizada en el PA2016-Fabricación Aditiva.

La primera parte de la tarea es la realización del programa de generación de trayectorias con MasterCam, posteriormente simularlo con Robotmaster con el objeto de comprobar que no se producen colisiones y por último generar el programa que se carga en el Robot para poder realizar la pared.

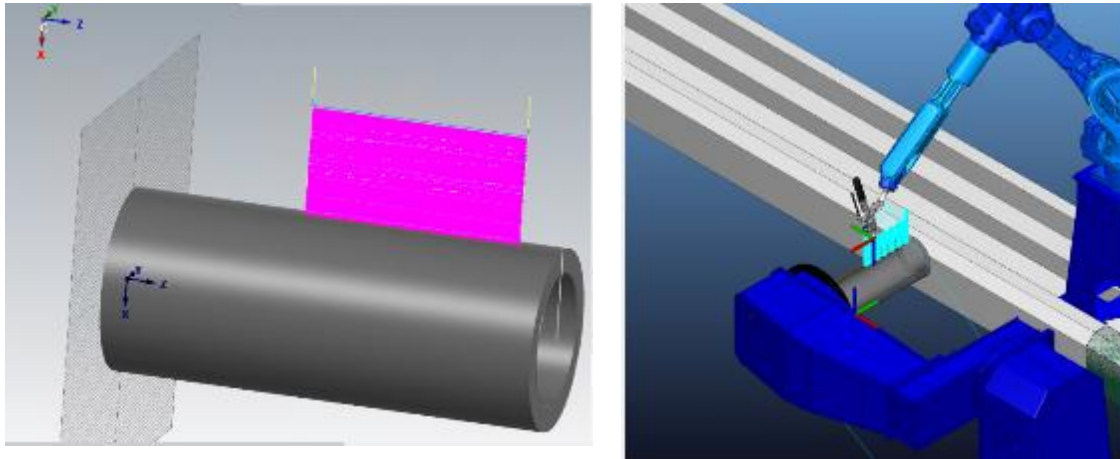


Figura 24. Simulación de la pared de AISI316L sobre tubo. Izq, Generación trayectorias MasterCam. Dcha Reproducción de la simulación mediante RobotMaster.

Para la ejecución de esta tarea se ha utilizado en primer lugar una máquina GTAW, en la cuál es necesario una instalación robótica de soldadura y debe ser manejada por un operador de soldadura. Se ha utilizado CCEN (Corriente continua electro al negativo). En este caso, se ha utilizado una fuente de energía FRONIUS® MagicWave 5000 de GTAW con el sistema robótico HP20D-6 Yaskawa Motoman y demás equipos auxiliares necesarios para llevar a cabo este trabajo. El gas utilizado en este caso fue argón puro (99,99%). El consumible utilizado has sido el AISI 316L de 1 mm de diámetro.

Después de realizar 4 pruebas modificando la frecuencia y la amplitud, se consiguieron obtener unos buenos resultados. La dirección de soldadura y el aspecto final se muestra en la Figura 26.

La primera capa tiene una longitud de 140 mm de longitud, después de 225 capas, cada capa subía aproximadamente 0,6 mm, se consiguió una altura de 135 mm, el espesor que se necesitaba conseguir para poder realizar todos los ensayos para comprobar las propiedades mecánicas de la pieza construida mediante fabricación aditiva con AISI 316L, era de 15 mm.

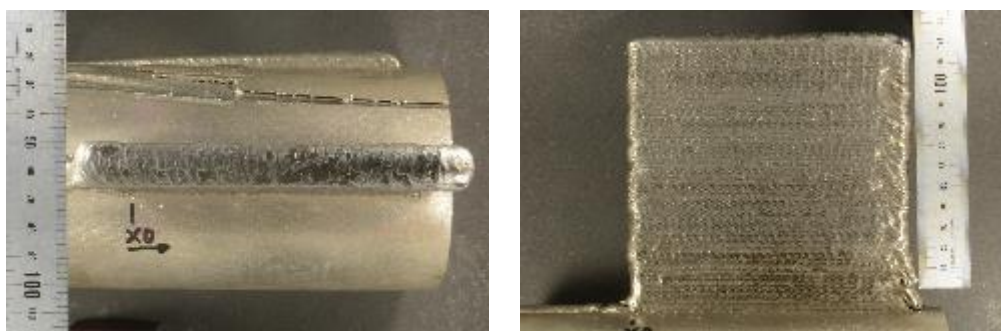


Figura 25. Aspecto final de la pieza realizada mediante fabricación aditiva con AISI 316L

Una vez terminada y medido el espesor la pared tenía un espesor 16 mm, los resultados son realmente buenos, y están dentro de las tolerancias, ya que se conoce que uno de los problemas principales de la fabricación aditiva es el post-mecanizado que hay que realizar a los componentes para conseguir una superficie lisa.

Sin embargo, la superficie lateral del componente presenta una superficie ligeramente ondulada debido a la deposición capa por capa inherente al proceso, el acabo conseguido supera las expectativas de la rugosidad que se suele obtener con fabricación aditiva con hilo con el proceso GTAW. Estos resultados obtenidos son más que satisfactorios, por lo que en este tipo de demostradores no se va a utilizar el proceso CMT.

El ancho del cordón es uniforme y muestra continuidad a lo largo de la pared, sin que se detecten defectos superficiales.

## B. Fabricación de un álabe

La fabricación de estos demostradores se ha realizado de acuerdo con la Tarea 1.3. El primer paso que se hizo fue realizar mediante Mastercam las trayectorias del álabe, posteriormente se simulan con el programa RobotMaster, para que la reproducción de la simulación se genere con las orientaciones de herramienta correctas y comprobar que no se producen colisiones con lo utillajes. Una vez realizada esta parte, RobotMaster general el programa que se carga al Robot.

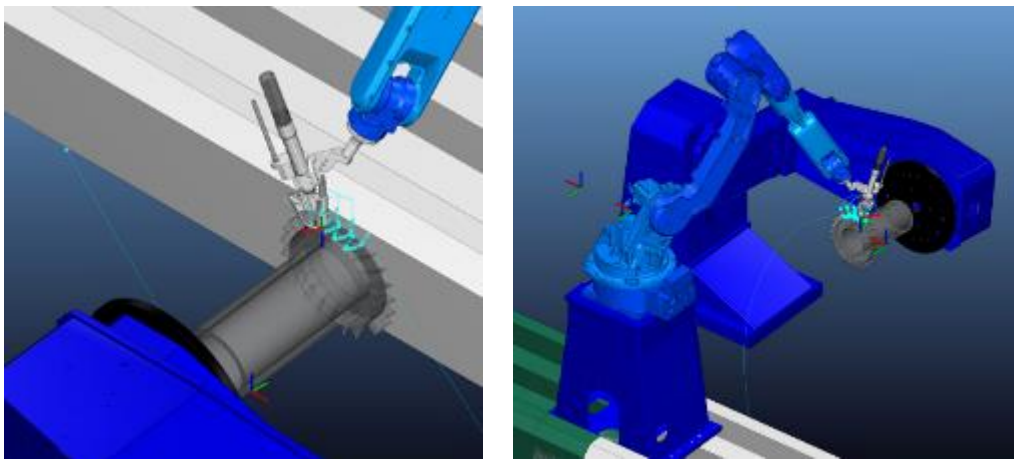


Figura 26. Simulación de la celda con el álabe fabricado con AISI 316L.

Para la ejecución hay que tener en cuenta no exceder la temperatura entre pasadas que se considere recomendable, para ello se puede realizar una pausa programada entre trayectoria, para que la pieza enfrié lo suficiente o si es posible realizarse un enfriamiento forzado entre capas.

Previo a la obtención de parámetros finales de la prueba se realizaron pruebas de parámetros en cordones más simples con el objetivo de mejorar el baño de soldadura y obtener el ancho de cordón deseado.

Para la ejecución de estas pruebas se ha utilizado una maquina GTAW, en la cuál es necesario una instalación robótica de soldadura y debe ser manejada por un operador de soldadura. En este caso, se ha utilizado una fuente de energía FRONIUS® MagicWave 5000 de GTAW con el sistema robótico HP20D-6 Yaskawa Motoman y demás equipos auxiliares necesarios para llevar a cabo este trabajo. El gas utilizado en este caso fue argón puro (99,99%). Se ha utilizado CCEN (Corriente continua electro al negativo). El consumible utilizado has sido el AISI 316L de 1 mm de diámetro y como material base se empleó Acero Inoxidable 304.

Para la realización de las pruebas fue necesario la utilización de un plato de garras como se ve en la Figura 27, que se atornilla al virador de la celda de soldadura de la planta piloto de Fundación Idonial.

Estos parámetros se optimizaron para su empleo con oscilación de 5 mm de amplitud y una frecuencia de 0,4Hz, empleándose parada de oscilación en los extremos durante 0,8s, consiguiéndose así un ancho de cordón en el entorno a los 15 mm y una altura de capa aproximada de 1mm.

En este caso se buscaba un ancho de cordón inferior, entorno a los 8mm, por tanto se modificaron los parámetros, buscándose disminuir el ancho de cordón, así mismo con el objetivo de buscar una solidificación más rápida del material, se redujo la frecuencia del pulsado, en base a sucesivas pruebas y se ajustó el avance hilo y la corriente a las nuevas condiciones.

Las capas aumentaban en z en torno al 0,6 mm. Las dimensiones son 47 mm de largo, por 7 mm de ancho y una altura en el caso más alto de 46 mm.

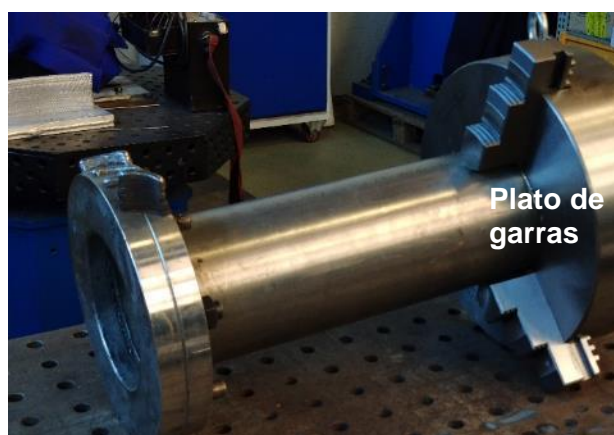


Figura 27. Álabe sobre el plato de garras.

El aspecto intermedio y final de la fabricación del álabe se muestra en las Figura 28 y Figura 29.



Figura 28. Álabe de una pared de 12 mm



Figura 29. Álabe de 40 mm de altura

El resultado fue satisfactorio aunque presentaba algunos descuelgues pero aceptables para este tipo de fabricación.

### C. Paredes inclinadas

Con la siguiente prueba se busca evaluar la capacidad que ofrece el proceso de construir paredes con cierto ángulo de inclinación. Para ello, es necesario establecer un desfase en la dirección transversal al cordón en cada una de las capas depositadas.

Esta prueba se ha realizado con el proceso GTAW, el hilo que se utilizó fue 316L. Se ha utilizado CCEN (Corriente continua electro al negativo). Se realizaron primero 7 pruebas, en el que se seleccionaron los siguientes parámetros, por ser los que mejores resultados presentaban. El amarre se realizó con tornillos a la mesa de Demmeler.

El gas de protección que se utilizó fue argón (99,99%), el caudal de gas utilizado en este caso fue 10 l/min. La intensidad 130 A, el voltaje 10-12 V. La velocidad de avance de hilo 0,6 m/min y la velocidad de desplazamiento de 50 cm/min y un stick out (distancia de la boquilla de contacto a la pieza) de 3 mm. Estas pruebas se realizaron con pequeños incrementos en x de 0,3 mm y en z de 0,1 mm.

La longitud de los cordones depositados fue de 240 mm y 4 mm de espesor y una altura de 10,2 mm, se realizaron 57 capas. La temperatura entre pasadas es de 100°C.

El resultado final se muestra en la Figura 30. La diferencia principal de estos resultados es que en otras ocasiones la pared se había realizado con ayuda del virador, pero en este caso, se ha aumentado la complejidad y la inclinación se ha realizado apoyándose solamente en los parámetros de soldadura.

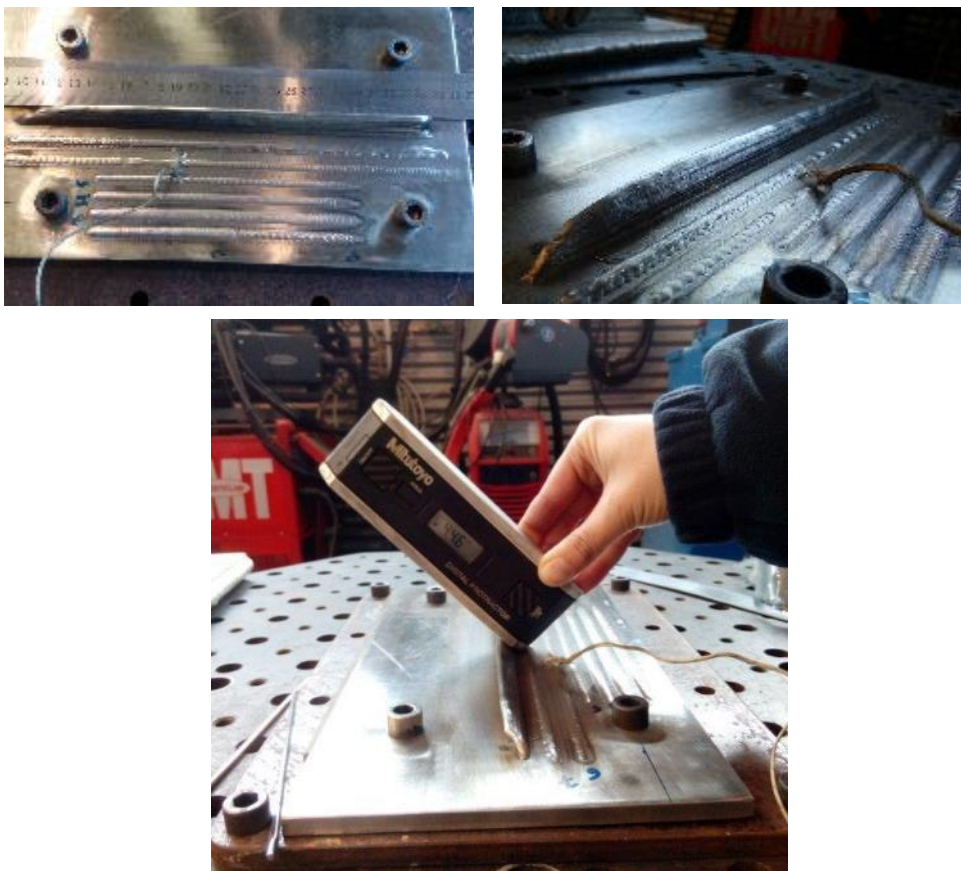


Figura 30. Pared inclinada (45° aprox.) de Acero inoxidable 316L.

Puesto que la el objetivo del experimento es determinar la capacidad del proceso en cuanto a la fabricación de paredes inclinadas, basándonos en los parámetros de soldadura, podemos decir que el acabado conseguido es satisfactorio.

### Tarea 3. Fabricación de demostradores de Inconel (625 y 718)

El Inconel pertenece a una familia de superaleaciones austeníticas de base níquel-cromo. Las aleaciones de inconel se utilizan normalmente en aplicaciones a altas temperaturas.

Este tipo de aleaciones son habituales, entre otras muchas aplicaciones, en intercambiadores de calor de hornos o en piezas de grandes motores.

Para la ejecución de esta tarea se ha utilizado una fuente de energía FRONIUS® CMT Advaced de GMAW con el sistema robótico HP20D-6 Yaskawa Motoman y demás equipos auxiliares necesarios para llevar a cabo este trabajo. El gas utilizado en este caso fue argón puro (99,99%). El consumible utilizado has sido el ERNiCrMo3 de 1 mm de diámetro. Adicionalmente se hicieron algunas pruebas con GTAW.

Tal como se muestra en la Figura 31 se han realizado pruebas de parámetros. Las primeras tratando de conseguir parámetros estables para un cordón continuo, con buen mojado y sin defectos.

En la siguiente etapa, tratando de conseguir la pared lo más fina posible, Figura 32, y correlacionando parámetros con espesor del cordón depositado.

Por último, tratando de conseguir llegar a depositar una pared de 45° de inclinación, Figura 33, correlacionado offset (distancia lateral) entre cordones con la inclinación conseguida.

Puesto que el objetivo del experimento es determinar la capacidad del proceso en cuanto a la fabricación de paredes finas inclinadas, basándose en los parámetros de soldadura, se puede decir que el acabado conseguido ha sido satisfactorio. Se han llevado a cabo en esta tarea pruebas de soldadura con dos tipos de consumibles de la serie 3D Print de Voestalpine Bohler, específicos para WAAM: Inconel 625 e Inconel 718, demostrando ambos un comportamiento muy similar. Debido a esto, se decidió centrar los esfuerzos en un único demostrador en Inconel 625 a base de paredes finas inclinadas, en vez de los dos previstos (uno en 625 y otro en 718).

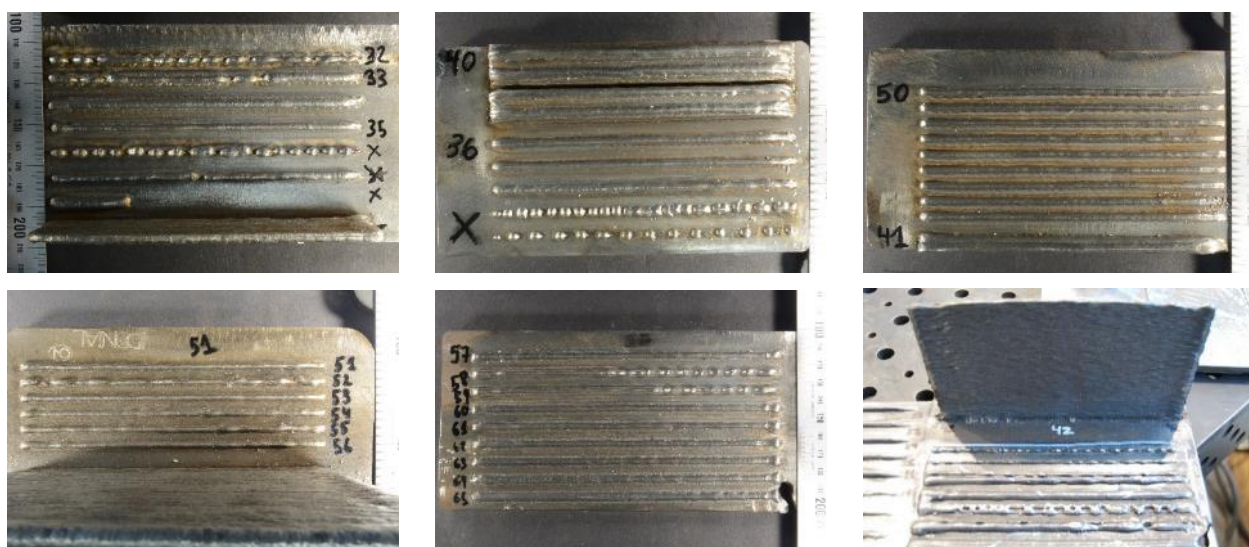


Figura 31. Pruebas realiadas con el Inconel



Figura 32. Pared de Inconel de bajo espesor: 3mm

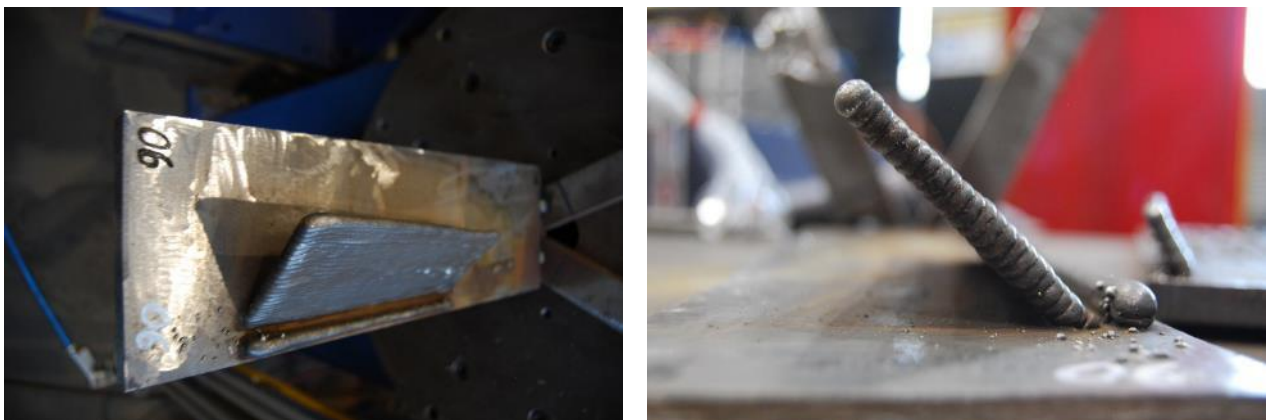


Figura 33. Pared de Inconel inclinada: 45°

La geometría seleccionada para el demostrador ha sido una tubuladura. Se trata de una parte fundamental dentro de los equipos del sector oil & gas (véase Figura 34). Todos los equipos necesitan ser conectados entre sí a través de este tipo de componentes. El procedimiento habitual es tratar, en la medida de lo posible, ajustarse a los elementos comerciales (véase Figura 35) tanto geoméricamente como en los materiales disponibles, pero no siempre es posible. Aun así, en el caso de materiales de altas propiedades mecánicas o anticorrosión (y por consiguiente precios elevados) la fabricación tiene que ser siempre bajo pedido, lo cual conlleva plazos de entrega muy largos.



Figura 34. Equipo a presión con múltiples conexiones



Figura 35. Ejemplos de tubaduras y conexiones de forja

Para la fabricación del demostrador se han seguidos los siguientes pasos:

1. Modelado 3D de geometrías complejas y simulación de la fabricación (alcances, colisiones, estrategias de fabricación, etc.)
2. Monitorizado del baño.

3. Monitorizado de la geometría real depositada
4. Escaneado de la geometría final y mecanizado



Figura 36. Proceso de fabricación de la tubuladura

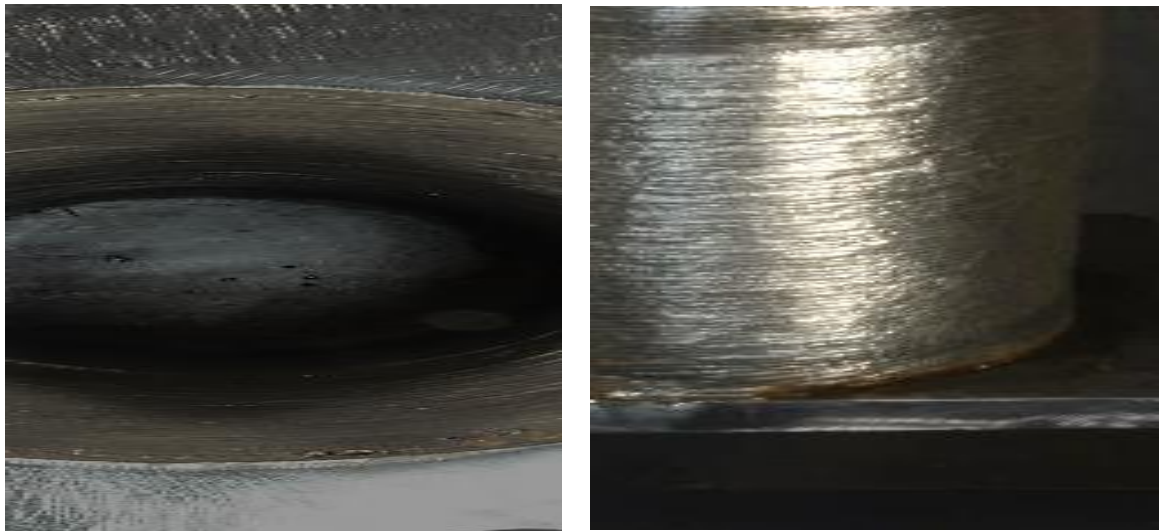


Figura 37. Demostrador en estado "as built", antes de ser mecanizado.

Las principales ventajas encontradas con este proceso han sido:

- Aumento de la libertad geométrica (se pueden diseñar equipos con tubuladuras a la carta)
- Mayor funcionalidad de la pieza (permite un diseño mucho más optimizado)
- Reducción de peso de las piezas
- Producción económica a pesar del bajo volumen (1 pieza de cada tipo)
- Producción bajo demanda
- Tiempos de entrega reducidos
- Reducción del consumo de materia prima (muy útil para material de alto coste)
- Fabricación de grandes piezas

Por otro lado, el uso de WAAM reduce el material desechado por mecanizado, consiguiendo una reducción de costes de material, mantenimiento y fabricación del producto.

El proceso de fabricación aditiva WAAM, puede ser una solución para piezas de este tipo.

## **HITO 2. DISEÑO DE PROTOTIPO A ESCALA REDUCIDA DE CÁMARA DE BAJO VACÍO. DEMOSTRADORES EN TITANIO.**

El interés del titanio y sus aleaciones nace de sus excelentes propiedades mecánicas específicas (relación entre propiedad mecánica y densidad) así como su excelente resistencia a la corrosión.

Existen sectores, como el aeronáutico, el que el peso es un factor crítico, en el que se buscan materiales o formas de fabricación que permitan reducirlo. El titanio cada vez es más utilizado frente al aluminio, ya que a pesar de tener mayor densidad, tiene mejores propiedades mecánicas. Debido al alto coste del titanio, la fabricación aditiva presenta una clara ventaja en relación con los métodos tradicionales, debido al ahorro de material.

Para materiales como el titanio que requieren una atmósfera protectora de gas inerte, por lo que tamaño de la pieza está limitado por la cámara de protección utilizada.

### **Tarea 1. Diseño de prototipo a escala reducida de cámara de bajo vacío**

El objetivo de esta tarea ha sido el diseño, el montaje y la puesta en marcha de una cámara de atmosfera controlada para la fabricación de piezas de titanio.

El diseño fue iniciado la anualidad 2018 y durante la anualidad 2019 se ha optimizado, se han realizado los acopios de material y se ha montado un prototipo.

Una de la mayores preocupaciones durante la etapa de diseño y de montaje ha sido que la cámara fuera lo más hermética posible. En una cámara hermética se puede hacer vacío antes de su llenado con un gas inerte. Esto reduce enormemente los costes en gases ya que se evita el tener que hacer varios ciclos de purga hasta conseguir la atmosfera inerte requerida.

La cámara ha sido diseñada para mantener una atmosfera inerte, con argón puro o nitrógeno puro y una concentración de oxígeno y vapor de agua inferiores a 1 ppm.

La cámara ha sido construida en acero inoxidable austenítico AISI 304, la ventana de policarbonato y los guantes de butilo. Las dimensiones finales de la cámara son de 2600 mm de longitud, 1500 mm de altura y 1000 mm de ancho aproximadamente (ver Figura 38).

La cámara ha sido pintada, en un principio, con una resina epoxi antioxidante blanca con gran resistencia química y abrasiva y una clasificación M-1, máxima capacidad ignifugante para pintura, en el ensayo de reacción al fuego de los materiales de construcción (según UNE 23.727-90).

Posteriormente se decidió aplicar también esmalte de poliuretano de gran dureza, buenas propiedades mecánicas, gran resistencia a productos químicos y disolventes, así como excelente estabilidad a la luz y a la intemperie.

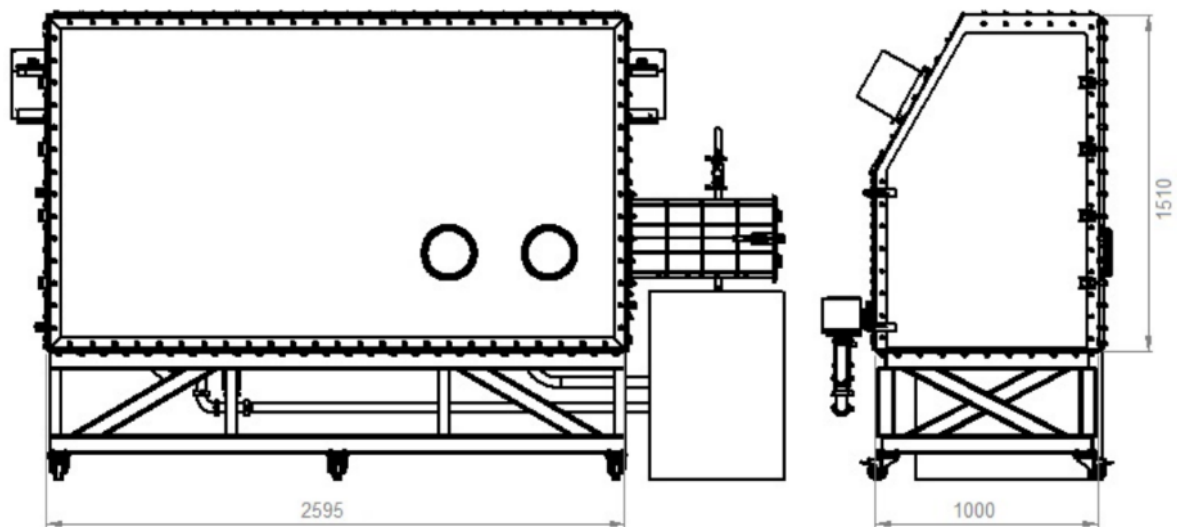


Figura 38. Dimensiones generales de la cámara de atmosfera controlada.

La cámara en su parte frontal consta de una pared transparente de policarbonato con dos aperturas para guantes que permiten la manipulación de las piezas en el interior sin tener que alterar la atmosfera protectora. Dichas aperturas pueden cerrarse con dos tapas, normalmente depositadas en el interior de la cámara para poder hacer el vacío sin que los guantes sean succionados hacia el interior de la cámara (véase Figura 43). Por otro lado, los guantes permiten poder abrir la pre-cámara desde el interior para poder cargar una pieza sin tener que rellenar de gas la cámara entera.

Los componentes más básicos se muestran en la Figura 39.

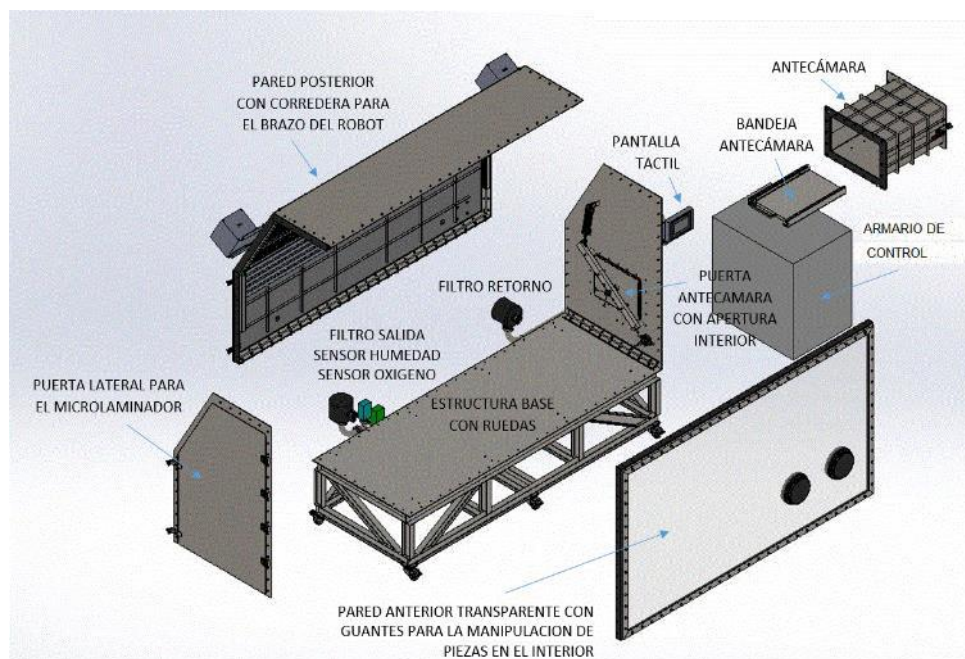


Figura 39. Sub-ensamblajes que componen la cámara de atmósfera controlada

La parte trasera incluye una apertura corredera para permitir la entrada del brazo del robot y su movimiento (véase Figura 41).

En un lateral se incluye una puerta de gran tamaño para poder introducir el sistema de micro-laminación que se ha diseñado para la fabricación de piezas de titanio.

En el lateral opuesto se ha incorporado una antecámara con una bandeja (véase Figura 40) con el fin de permitir la introducción de componentes en la cámara sin tener que volver a hacer el vacío y rellenar la cámara completa. La antecámara ha sido diseñada para transferir el material necesario para la fabricación de piezas mediante WAAM dentro o fuera de la cámara de vacío de sin contaminar la atmósfera interna durante los respectivos procedimientos.



Figura 40. Antecámara

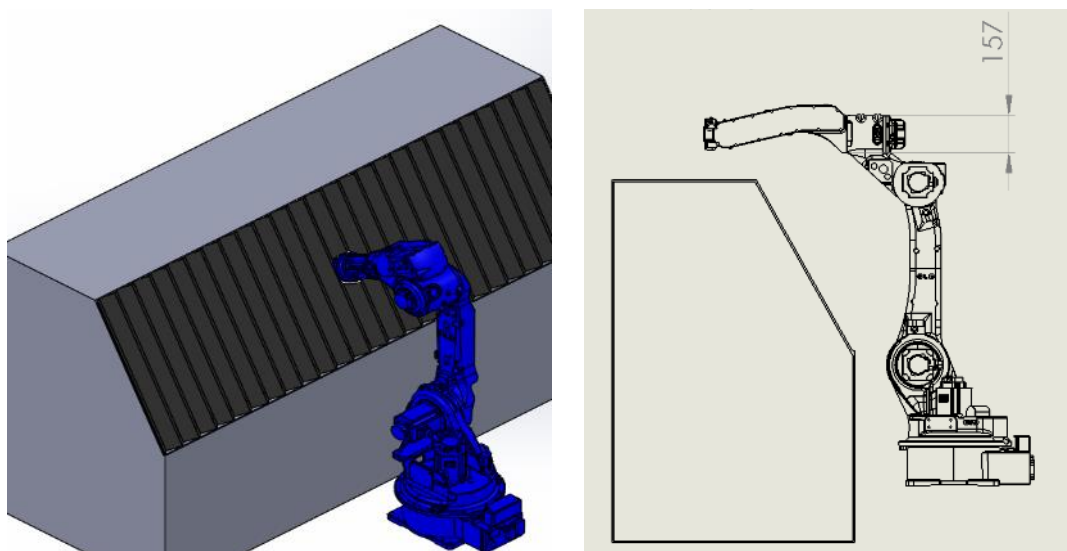


Figura 41. Simulación de la pared trasera corredera de la cámara de atmosfera controlada con el robot recién adquirido MH24 con brazo hueco

Uno de los grandes retos durante la fabricación ha sido conseguir la hermeticidad necesaria. Para ello se han incluido gomas en todas las uniones (véase Figura 42). En el caso de la tornillería se han utilizados aisladores de goma comerciales, esta vez para garantizar la estanqueidad en lugar de para evitar derivaciones eléctricas.

Todas la conexiones de equipos (sensores y bomba principalmente) así como tubos han sido realizadas mediante sistemas comerciales tipo KF de distintos tamaños (véase Figura 45).

Se han incluido dos sensores (Figura 46):

- Sensor humedad MB MO SE1 y
- Sensor oxígeno MB OX SE.

Así como filtros tanto a la salida como a la entrada de gas en la cámara:

- Caja de filtro Leybold FH40 para Cartucho para filtro de polvo (DF 40-65 Kat. Nr. 140141S) e inserto de adsorción (RF 40-65 Kat. Nr. 140142A)



Figura 42. Gomas utilizadas para garantizar la hermeticidad de todas las uniones



Figura 43. Orificios con guantes para la manipulación de piezas con tapas para poder hacer el vacío

Por último, en la Figura 47 se muestran algunos detalles como el panel de control (o Touchpanel) de Siemens así como la unidad de control y la bomba de vacío (cuyos cálculos se incluyeron en la justificación de la anualidad de 2018).

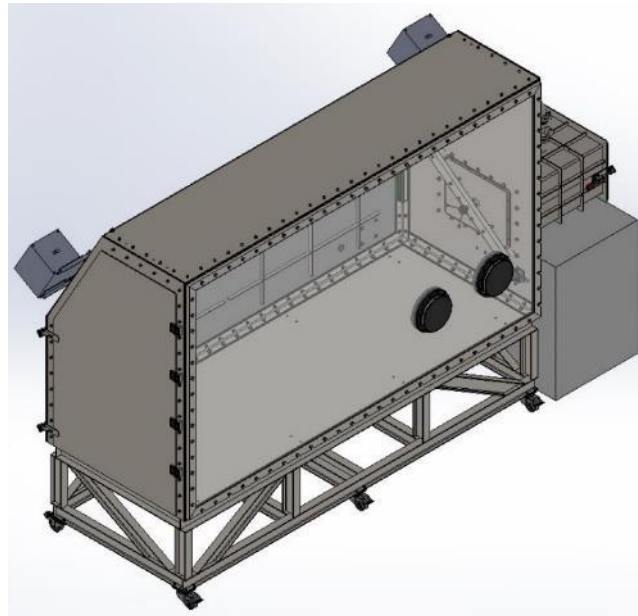


Figura 44. Sistema de guantes y de cierre interior de la precámara con volante



Figura 45. Conexiones para vacío de la marca Leybold utilizadas

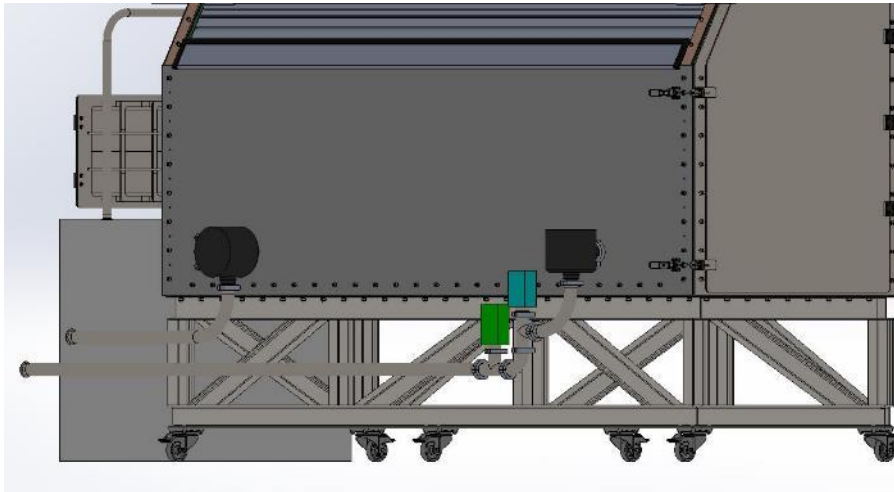


Figura 46. Sensor de humedad (verde), sensor oxígeno (azul) y caja de filtro para cartucho de filtro de polvo e inserto de adsorción (negro)



Figura 47. Detalles del panel y del sistema de control y de la bomba de vacío

Otro sistema que ha sido necesario diseñar y mecanizar a medida ha sido el cierre interior de la precámara. Dicho sistema tiene que ser estanco y poder cerrarse desde dentro mediante el sistema de guantes (véase Figura 48 izquierda).

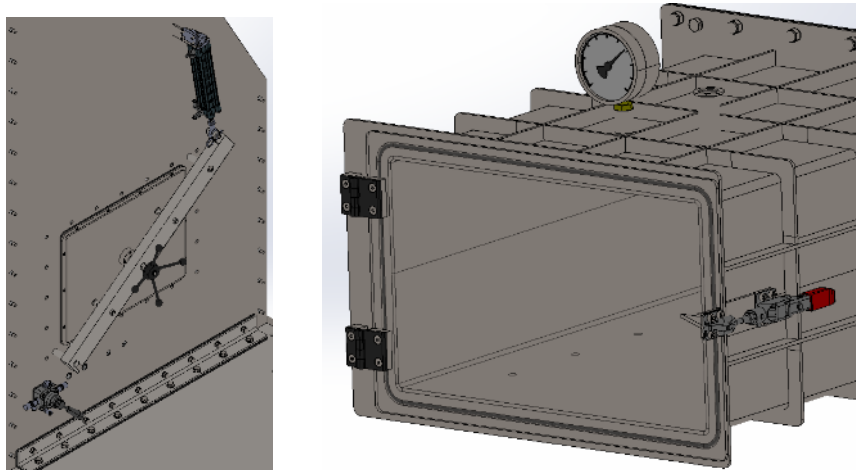


Figura 48. Mecanismos del sistema de cierre de la puerta interior de la precámara y de los alojos de las puertas y las tóricas

Adicionalmente ha sido necesario mecanizar todos los encajes de las puertas y los alojos de las tóricas (véase Figura 48 derecha) y piezas como: Tope puerta corredera, Placa soporte bisagra, Barra roscada corta sujeción abrazadera, Barra roscada larga sujeción abrazadera, Placa soporte bisagra antecámara, Placa sujeción puerta bisagra, Pasador roscado guía puerta, Tubo cuadrado cierre puerta interior antecámara, Casquillo guía puerta interior antecámara, Casquillo roscado puerta interior antecámara, Soporte oscilante unión tubo vástago, Bisagra puerta corredera, etc.

Por último, ha sido necesario modificar el cabezal de soldadura y los soportes de los sensores para que pueda funcionar dentro de la cámara sin colisionar.

El control seleccionado ha sido el controlador lógico programable (PLC) basado en la plataforma de control abierto PLCnext de Phoenix Contact (véase Figura 49). Se trata de un PLC dirigido a aplicaciones de control modular distribuido para automatización industrial e investigación para la construcción de maquinaria. El PLCnext Control combina la robustez y seguridad de un PLC clásico con la apertura y flexibilidad de los dispositivos inteligentes de IIoT (Internet de las cosas industrial).

Se trata de una controladora que permite la programación en varios lenguajes, los clásicos para la programación de PLCs así como los propios de programación de PCs.

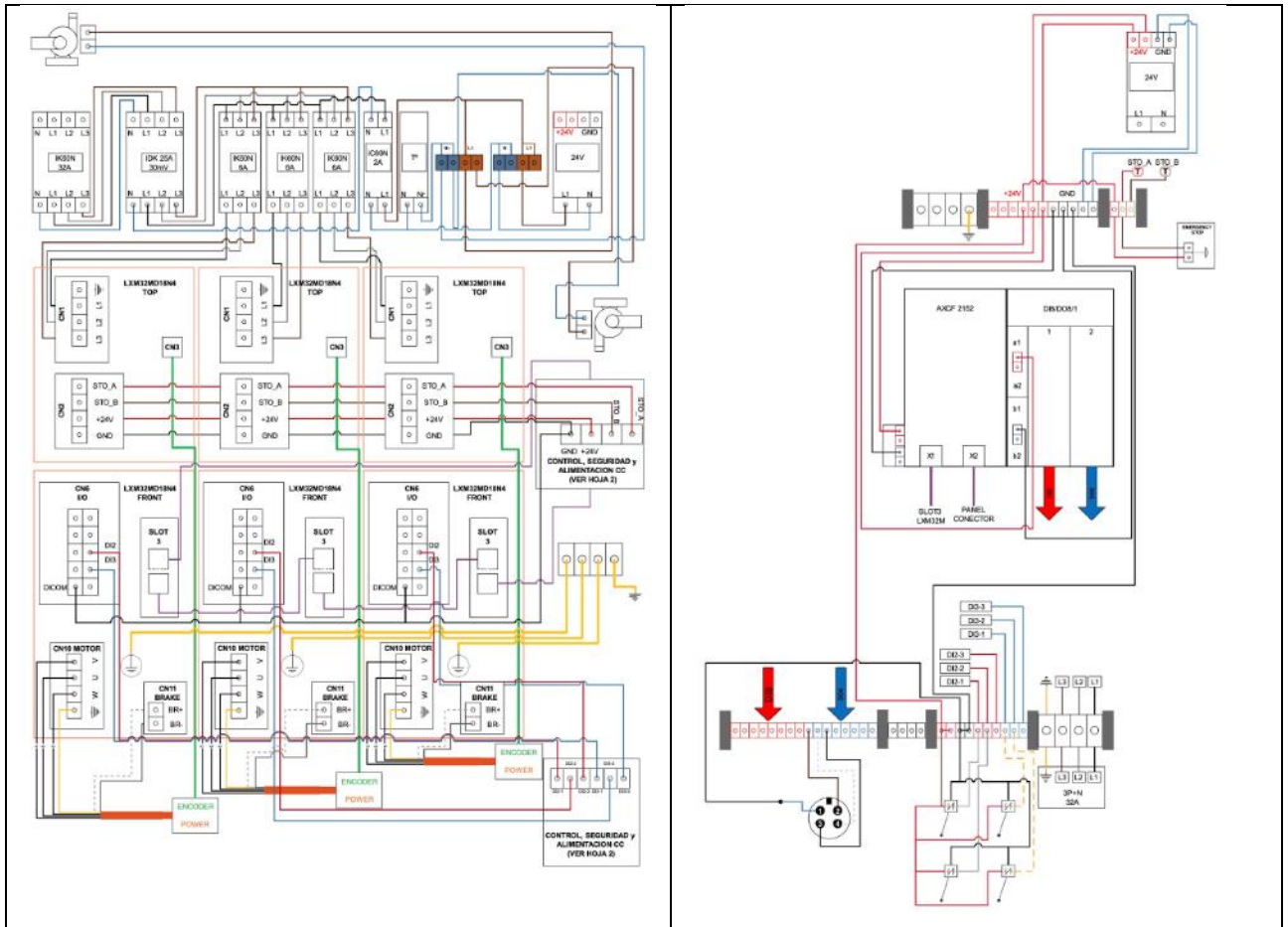


Figura 49. Esquema correspondiente al armario de control de la cámara

Se va a seguir trabajando en la programación durante la anualidad 2020 para incluir el control del sistema de micro-laminación cuyo diseño ha sido iniciado en el 2019.

Durante la fabricación de los demostradores de titanio en la cámara, se detectó la necesidad de incluir una mesa con un sistema de guías que permitiera hacer los montajes en el exterior y meter el conjunto, tanto las piezas como los utillajes, con mayor comodidad.

Otra modificación identificada, debido a interferencias detectadas durante el diseño del micro-laminador, ha sido la reubicación del sistema de tuberías de entrada y salida del gas (en la parte trasera de la cámara). Lo que ha supuesto la adquisición a finales de año de algunos elementos de conexión de tuberías. Véase Figura 50.

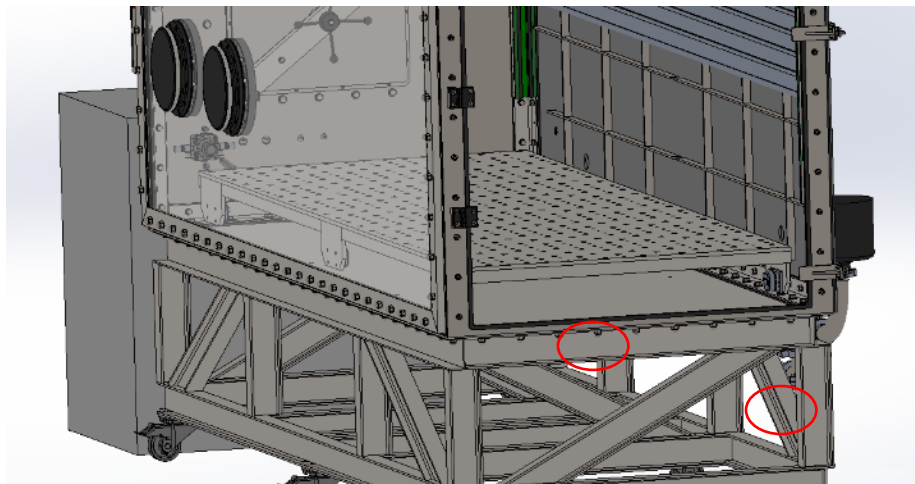


Figura 50. Introducción de la mesa guiada y modificación de la posición del sistema de tuberías den entrada y salida de aire

## Tarea 2. Fabricación de demostrador en Titanio

El objeto de esta tarea es realizar pruebas sobre sustrato base, realizando diferentes geometrías. Los componentes se realizaran utilizando un material de aporte de titanio, utilizando soldadura GTAW digital (Gas tungstenarc welding) con sistema robótico de 6 ejes. Las piezas a estudio presentan partes rectas y curvas, perpendiculares al sustrato base y uniones en ángulo.

En una primera parte ha sido necesario obtener los parámetros de soldeo que permitieran conseguir una buena optimización del proceso de modo que no existe mucha diferencia entre el material aportado y el material necesario para la fabricación de la pieza. Véase Figura 51.



Figura 51. Pruebas de parámetros realizadas con titanio

Tal como se muestra en la pared de la Figura 52, las tensiones residuales generadas durante el proceso de fabricación de piezas de titanio asociadas a la contracción que se produce durante el enfriamiento, pueden producir el agrietamiento de la pieza. Por ello, es necesario seleccionar una secuencia de soldeo que minimice las tensiones.

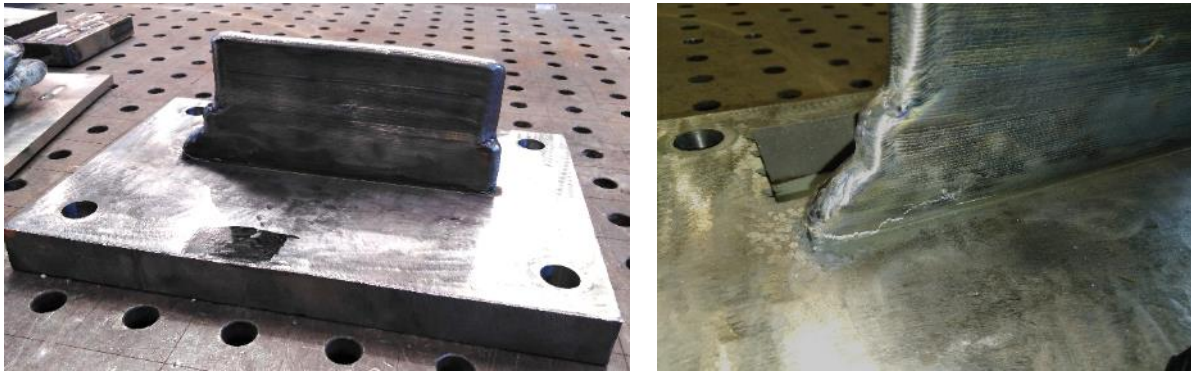


Figura 52. Pared de titanio.



Figura 53. Soldadura de la pared en el interior de la cámara de atmosfera controlada.

Existen publicaciones que afirman que el titanio fabricado de manera aditiva, puede llegar a presentar mejores propiedades que el fabricado de forma convencional, en particular en fatiga de alto número de ciclos. Sin embargo se ve afectado por la fuerte anisotropía en la resistencia a tracción y al alargamiento. Tal como se puede ver en los resultados del ensayo macrográfico mostrados en la Figura 198, debido a las características de solidificación, los componentes fabricados por WAAM muestran un grano dendrítico. Esto da como resultado una mayor resistencia en la dirección de paralela a la deposición de las capas, tal como se observa en los resultados

obtenidos en las tracciones y que se muestran en la Figura 201. Por el contrario, presenta un alargamiento superior en la dirección perpendicular.

La geometría seleccionada para hacer el demostrador ha sido una tija de moto, el diseño original ha sido cedido por los alumnos que conforman el equipo de motostudent de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón. El diseño de partida ha sido modificado reduciendo considerablemente su peso teniendo en consideración los esfuerzos a soportar por dicha pieza (véase Figura 54).

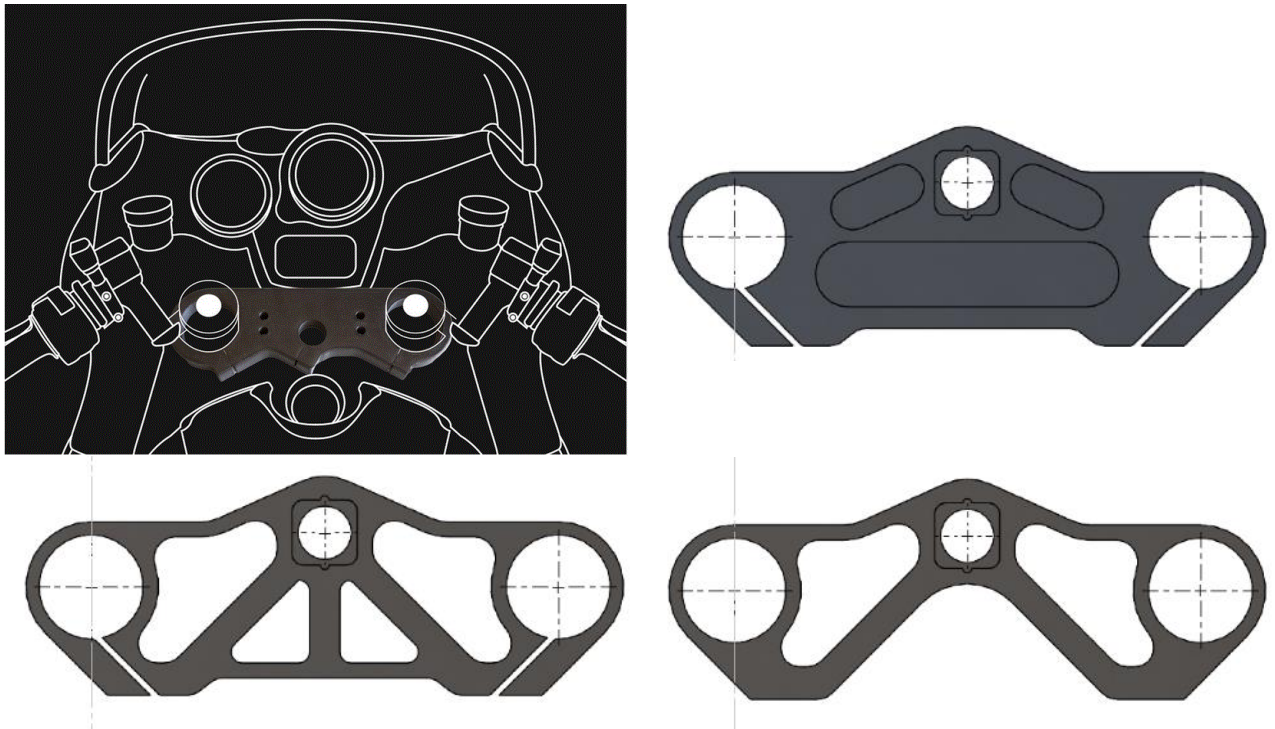


Figura 54. Proceso de rediseño de la pieza para la optimización y la reducción de peso

Los pasos seguidos han sido los mismos que con los otros demostradores:

1. Modelado 3D y optimización de la geometría
2. simulación de la fabricación (alcances, colisiones, estrategias de fabricación, etc.).

Para ello, en esta tarea, previa a la realización de la pieza, es necesario identificar un plano de simetría dentro del volumen del componente en el que la deposición del material se realiza alternando capas a cada lado del plano para equilibrar las tensiones residuales.

Adicionalmente, cuando se utiliza titanio, el arco se ve afectado y produce un incremento de la rugosidad superficial. Por consiguiente, el proceso GTAW digital (Gas tungsten arc welding) o por arco plasma son los procesos más adecuados cuando el material utilizado es el titanio. Estos procesos, sin embargo, dependen de una alimentación de hilo externa. El hilo debe ser aportado siempre desde la misma dirección, lo que requiere la rotación de la pistola, lo que complica la programación del robot.

Los pasos a seguir una vez definida la geometría son:

- a. Diseño de la estrategia de fabricación y generación de las trayectorias (véase Figura 55).
- b. Simulación de los movimientos del robot comprobando alcances, colisiones y orientaciones de la pistola (véase Figura 56).
- c. Generación del programa del robot (véase Figura 58).

- d. Alineación y calibración de la celda y del robot y comprobación de las trayectorias (véase en la Figura 59 la primera y la segunda prueba y en la Figura 62, la tercera y última prueba)

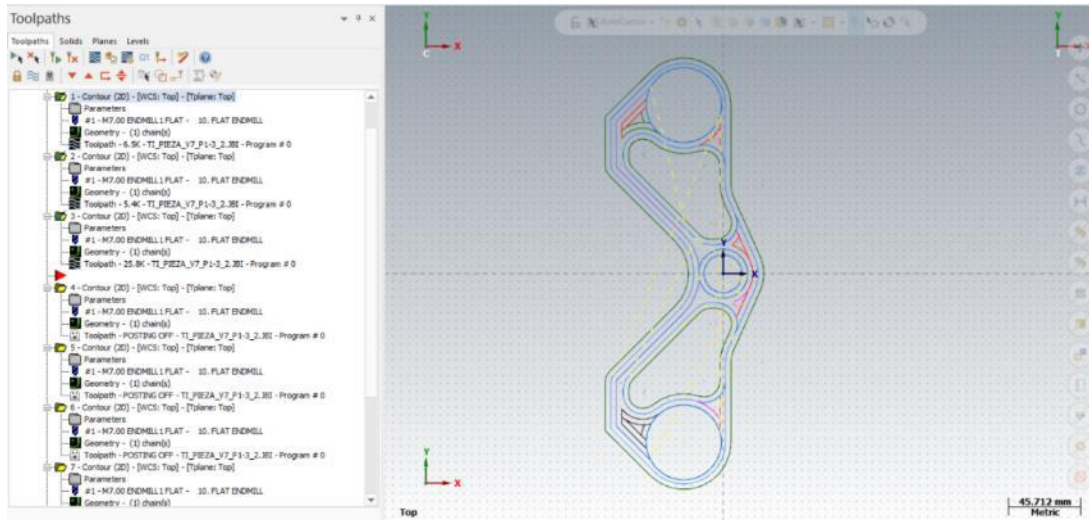


Figura 55. Programa de generación de trayectorias para la fabricación de una tija de Titanio

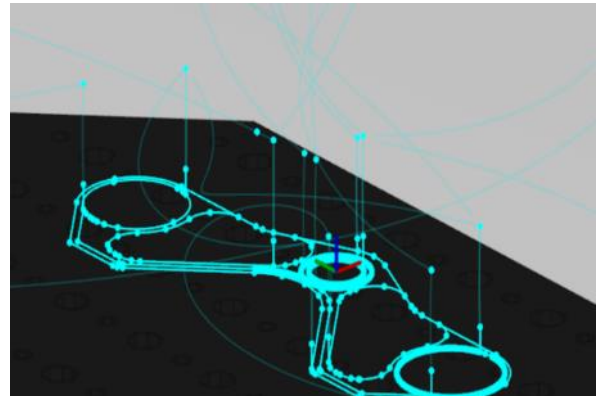
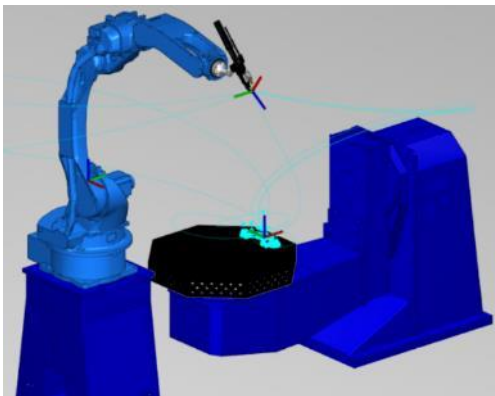


Figura 56. Simulación de la celda con el nuevo robot MH24 de Yaskawa para la fabricación de la tija de Titanio

La prueba de trayectorias mostrada en la Figura 59 derecha ha sido realizada fuera de la cámara, con protección gaseosa adicional, pero el resultado obtenido ha sido un arco inestable y un baño completamente amorfo. Se ha establecido un nivel máximo de 1200ppm de oxígeno.

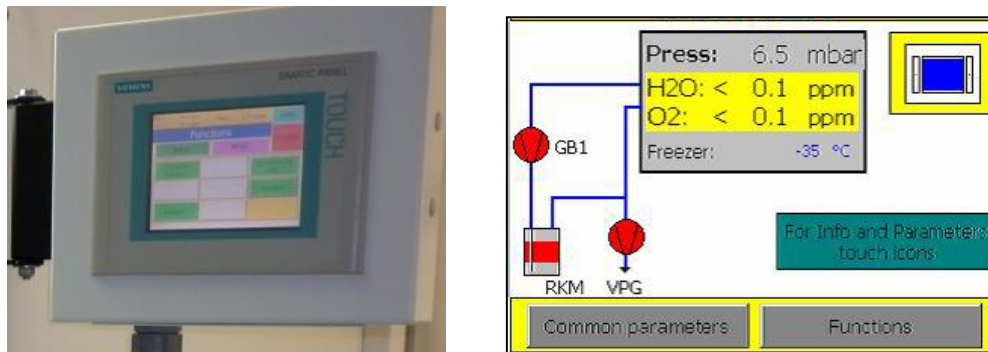


Figura 57. Pantalla principal durante el funcionamiento de la cámara

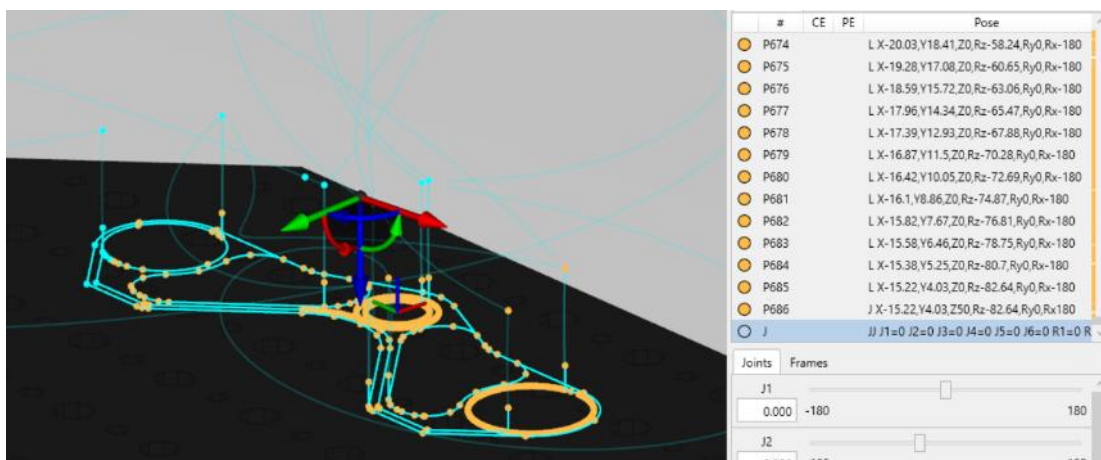


Figura 58. Puntos y líneas del programa generado el nuevo robot MH24 de Yaskawa

3. Monitorizado del baño. Para ello se recurre a:
  - a. Un escáner posicionado detrás del arco.
  - b. Una cámara termográfica posicionada detrás del arco
  - c. Sensores para la monitorización de parámetros eléctricos

En la Figura 62 se muestra el diseño de la instrumentación del cupón (termopares, galgas y acelerómetro). Dicha instrumentación se explica más detenidamente en la tarea 3 del Hito 4.

4. Monitorizado de la geometría real depositada.
5. Escaneado de la geometría final para el mecanizado posterior (Figura 61).



Figura 59. Pruebas de trayectorias y alineación con el nuevo robot MH24 de Yaskawa

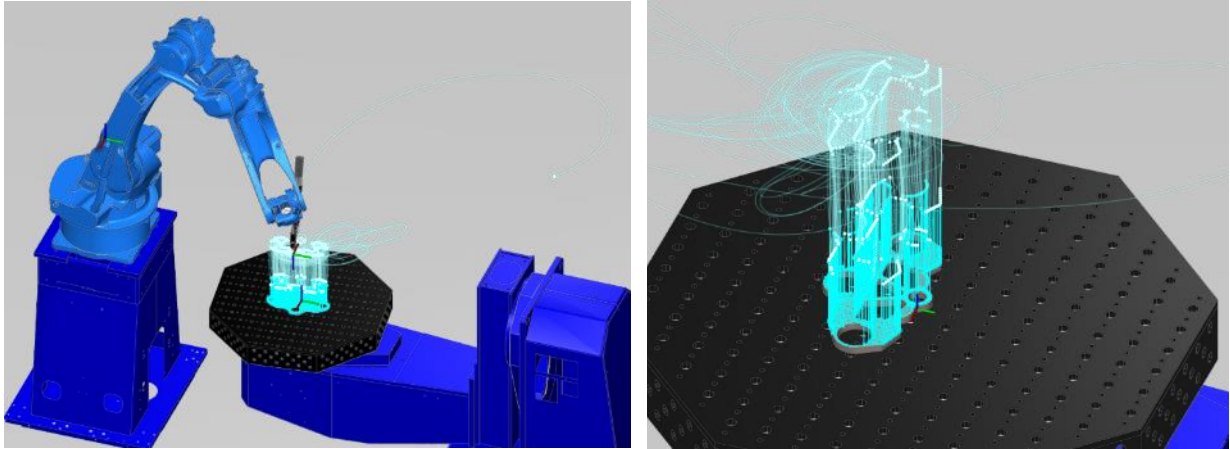


Figura 60. Simulación de trayectorias con el nuevo robot MH24 de Yaskawa

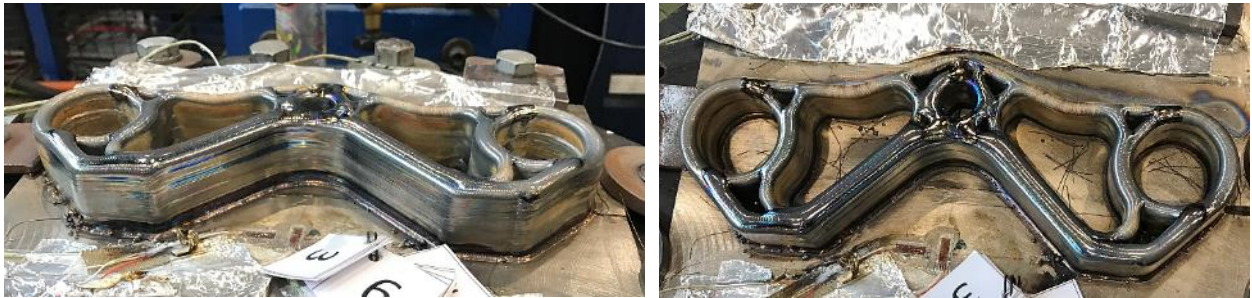


Figura 61. Tija de titanio antes de mecanizar

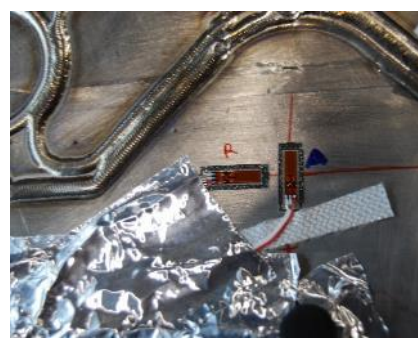
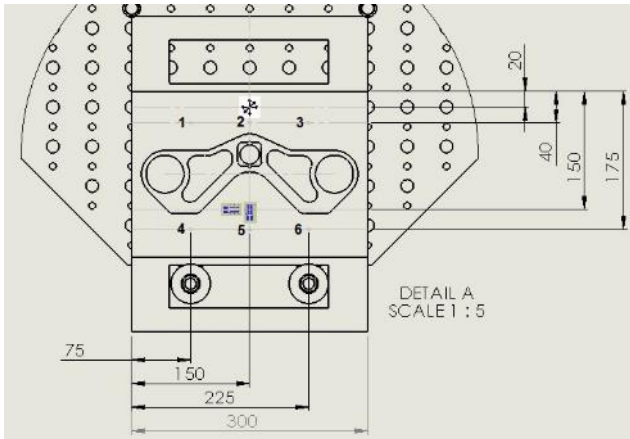


Figura 62. Cupón de titanio instrumentalizado

### HITO 3. MEJORA DE PROPIEDADES MECÁNICAS (MEDIANTE ROLLING) Y ACABADO SUPERFICIAL (MEDIANTE REFUSIÓN)

De cara a contrarrestar la problemática asociada al proceso WAAM, como son la formación de grandes granos dendríticos y las altas tensiones residuales debido al proceso de solidificación, se ha diseñado un proceso de micro-laminación en línea con la soldadura. Se trata de una laminación a alta presión para deformar plásticamente el material inmediatamente después de ser depositado mediante la aplicación de una carga vertical tal como se muestra en la Figura 63.

Con este proceso se busca refinar la microestructura del grano produciendo con ello una mejora de las propiedades mecánicas. La energía aportada al sistema cristalográfico, combinado con el calor generado por el metal aportado favorece la recristalización.

Además de los beneficios microestructurales que se han observado, la deformación introducida por el rodillo se espera que dé como resultado una disminución de las tensiones superficiales y mejora la isotropía de las propiedades mecánicas.

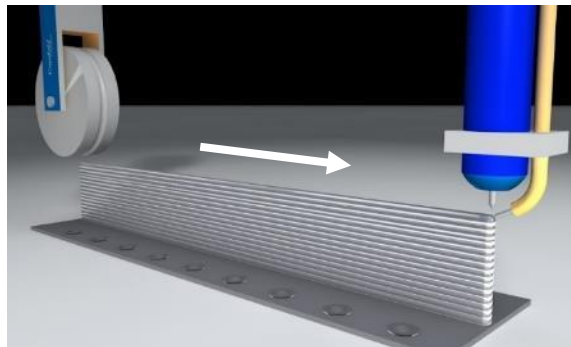


Figura 63. Esquema del equipo de laminado y soldadura mediante WAAM.

Los requisitos principales para el diseño del micro-laminador han sido, las dimensiones máximas, pues debía de poderse introducir dentro de la cámara de atmosfera controlada diseñada en las anualidades 2018 – 2019, la capacidad de carga, debía de poder llegar a los 75 kN (7,6Tn) necesarios para conseguir el nivel de afino de grano requerido y por último que el sistema fuera lo más sencillo y barato posible.

#### Tarea 1. Diseño de prototipo a escala reducida de microlaminador

Tal como se detalló en la justificación de la anualidad anterior, en un principio se diseñó un sistema simétrico basado en un cilindro, con una célula de carga, montado sobre un sistema de guiado lineal formado por dos guías accionadas (motrices) suspendidas de 4 pilares, tal como se muestra en la Figura 64, en la imagen de la izquierda.

Lamentablemente, debido a la necesidad de facilitar el acceso del robot por la parte superior trasera y el acceso mediante los guantes, situados en la parte inferior delantera, el sistema final pasó a ser asimétrico (véase Figura 64 derecha).

Adicionalmente, dada la gran carga a soportar por el sistema de guiado lineal, fue necesario dividir el sistema de guiado en dos sistemas, uno que soporta la carga formado por dos guías conducidas y otro accionado formado por dos guías motrices (véase Figura 64 derecha).

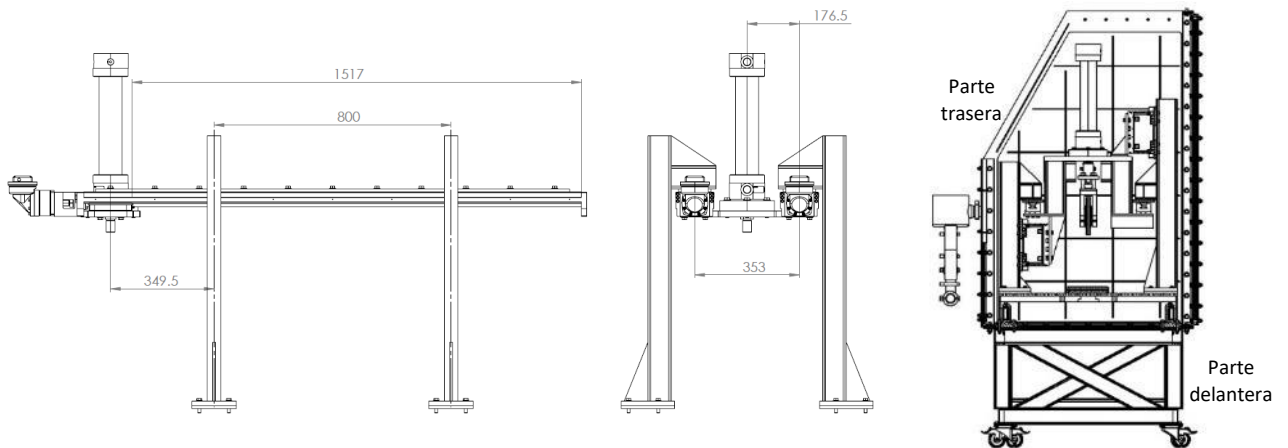


Figura 64. Diferentes diseños de micro-laminador. Izquierda: diseño inicial. Derecha: diseño asimétrico con sistema de guiado en la parte interna de los pilares

Otro cambio que se tuvo que hacer fue la colocación del sistema de guiado por el lado exterior de los pilares con el fin de dejar más espacio para la pieza a fabricar (véase Figura 65).

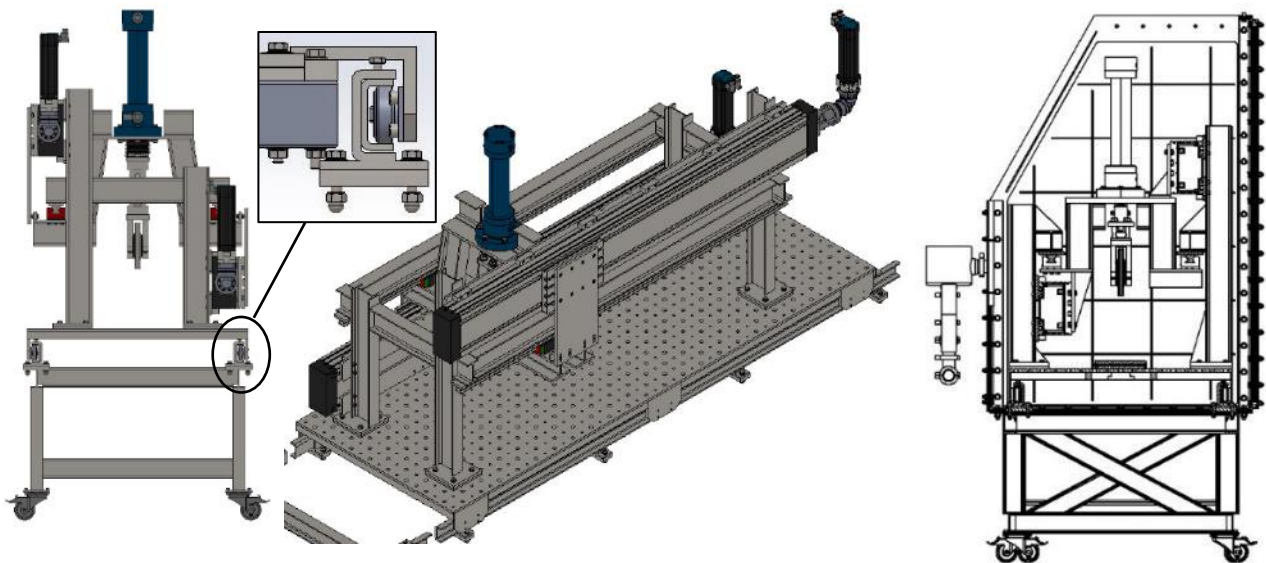


Figura 65. Micro-laminador. Diseño final, fuera y dentro de la cámara de atmósfera controlada

La estructura principal ha sido realizada con vigas y perfilaría de acero al carbono soldada. La mesa de apoyo se ha construido con una chapa de acero inoxidable de gran espesor taladrada para permitir el uso de sistemas estándar de sujeción de piezas como los mostrados en la Figura 66.



Figura 66. Sistemas estándar de sujeción para mesas perforadas

Dada la magnitud de las cargas a aplicar, tanto los accionamientos (las 4 guías lineales, los 2 motores y sus variadores, etc.), como el sistema hidráulico (cilindro, grupo, mangueras, electroválvula, etc. mostrados en la Figura 8) integrados son de gran capacidad.

En la siguiente Figura se muestran los dos sistemas de guías lineales incorporados en el micro-laminador. El primero, el modelo CTV 200 3205 de la marca Unimotion, accionado por dos servomotores síncronos de corriente alterna BSH1002P12F2A. Cada uno de estos servomotores es controlado desde un servo driver Lexium 32M LXM32MD18N4 de Schneider Electric. El segundo, el modelo RGH35CA de la marca HIWIN, preparado para soportar grandes cargas y en concreto, las aplicadas por el cilindro.

Para las pruebas de laminación ha sido necesario el uso de un grupo hidráulico (véase Figura 68), cedido por la unidad de mecánica estructural, conectado al micro-laminador por una electroválvula (véase Figura 69), un cilindro, mangueras y racorería hidráulica.



Guías lineales de HIWIN, modelo RGH35CA



Guías lineales de UniMotion, modelo CTV 200 3205

Figura 67. Sistemas de guías lineales incorporados al microlaminador

La Figura 68 y la Figura 69 muestran imágenes de algunos de los componentes del sistema de micro-laminación. En ellas se pueden observar las guías, los motores y el cilindro montados sobre la estructura mecano-soldada y la mesa perforada que se desliza, mediante unas ruedas sobre unos carriles, tal como se muestra en la Figura 65. Para limitar el movimiento se utilizan dos sensores magnéticos (Figura 72) compatibles con las guías, que actúan como finales de carrera conectados directamente a las entradas digitales de los servodrivs.

Para las pruebas se fabricaron dos geometrías distintas de rodillos, la primera con un resalte y la segunda con una hendidura central (Figura 70).

La Figura 70 muestra el display al que se ha conectado la célula de carga (Figura 68) para la medición precisa de la carga aplicada por el cilindro.



Figura 68. Micro-laminador montado sobre una mesa perforada de soldadura que desliza sobre unos carriles

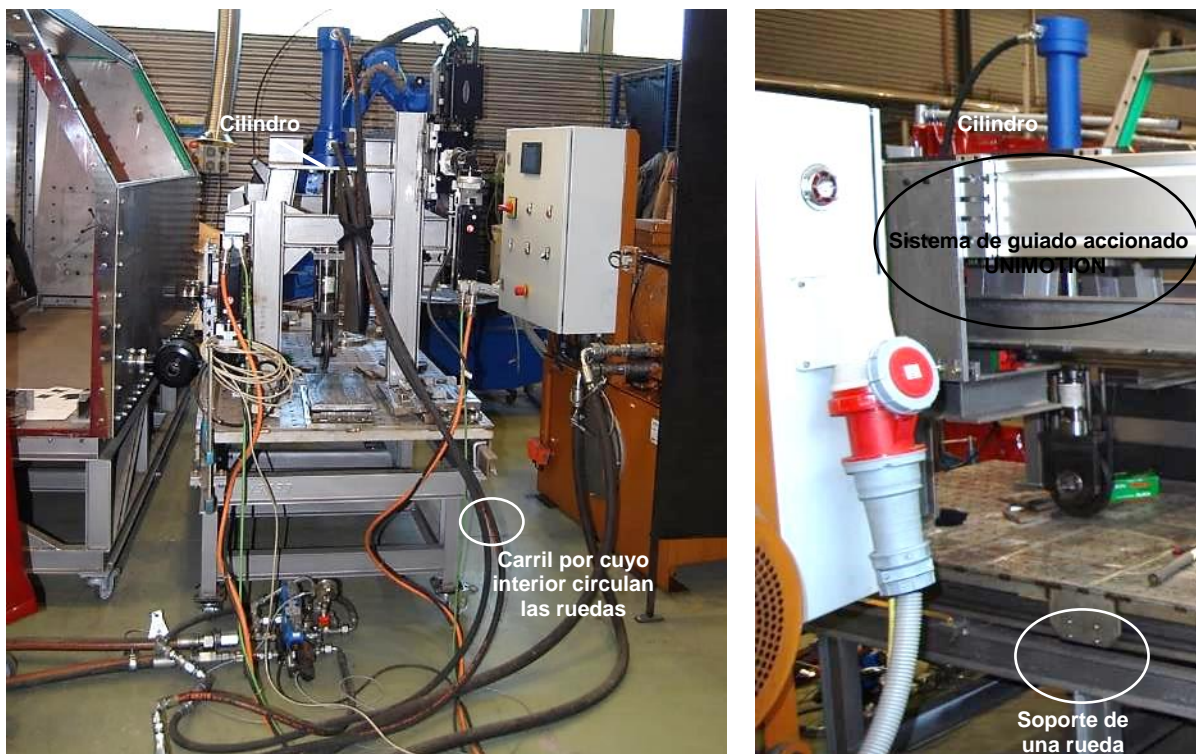


Figura 69. Detalles de la instalación de micro-laminación antes de meterla dentro de la cámara de atmosfera controlada.

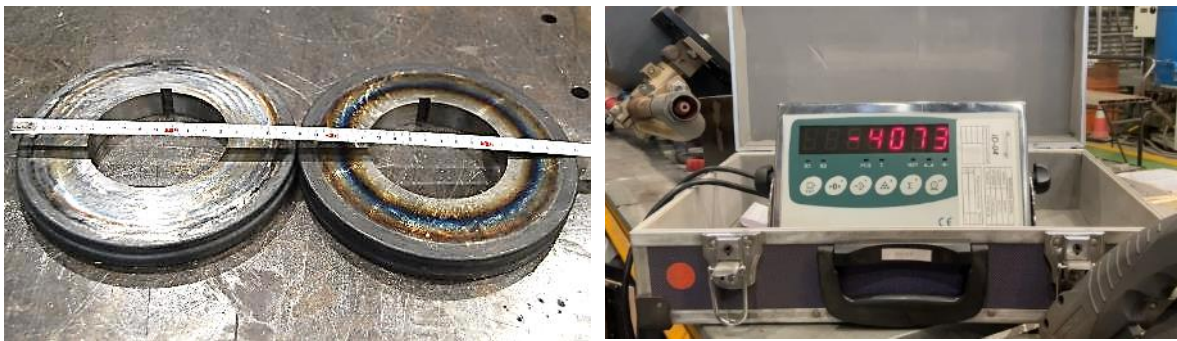


Figura 70. Izquierda: Geometría de los rodillos del micro-laminador. Derecha: Indicador de la célula de carga

Los principales componentes utilizados en el armario eléctrico se muestran en la Figura 72. El PLC utilizado es un *PLCnext AXC F 2152* de *Phoenix Contact*. Versión de Hardware 02 y Firmware 2020.6.1. Sin módulos adicionales cuenta con dos puertos de comunicación Ethernet, actúa como controlador y equipo PROFINET y es compatible con varios protocolos de comunicación como por ejemplo HTTP, HTTPS, SFTP y OPC UA al estar basado en un sistema operativo Linux. En el armario de control existen además un módulo de entradas y salidas digitales y otro para entradas y salidas analógicas, que son el *AXL F DI8/1 DO8/1 1H* y el *AXL F AI2 AO2 1H* respectivamente. Para permitir la comunicación con estos servodrivens mediante un bus de campo es necesario un módulo de comunicación adicional. Para nuestra aplicación utilizamos el módulo Ethernet TCP/IP *VW3A3616*, que nos permite comunicarnos utilizando los protocolos Ethernet IP y Modbus TCP.

Para operar con la planta se utiliza un panel web *WP 4120-WXPS*, que accede a la dirección IP del PLC y muestra la interfaz creada desde el *PLCnext Engineer*. Este panel también permite conectar un teclado y un ratón para hacer más cómoda la introducción de parámetros.

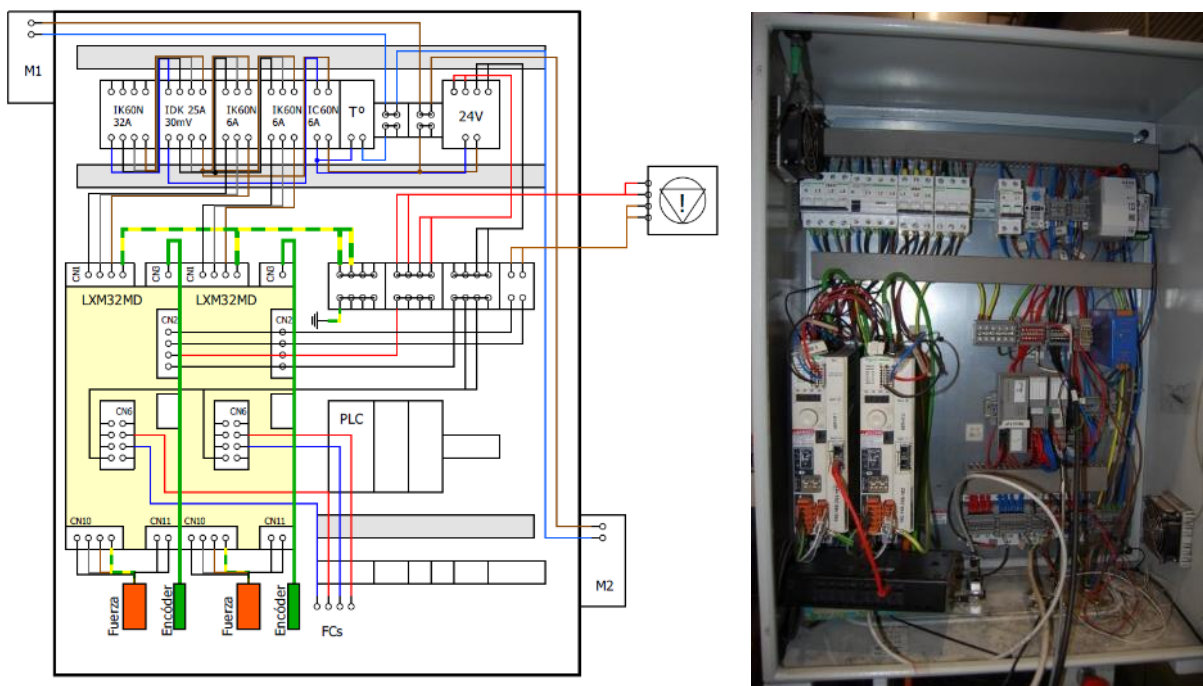


Figura 71. Plano e imagen del armario de control



Panel web WP 4120-WXPS



Motor BSH1002P12F2A de Schneider Electric.



Finales de carrera magnéticos SMT 65 TP K-NC



PLC PLCnext AX C F 2152 de Phoenix Contact. Versión de Hardware 02 y Firmware 2020.6.1. Módulo de entradas y salidas digitales AXL F DI8/1 DO8/1 1H y Módulo entradas y salidas analógicas AXL F AI2 AO2 1H



Servo driver Lexium 32M de Schneider Electric



Módulo Ethernet TCP/IP VW3A3616 de Schneider Electric

Figura 72. Arriba a la izquierda el panel de control de la máquina, el motor, modelo de los finales de carrera y los componentes principales del armario

## Programación

La implementación del software en el PLC se ha realizado mediante el entorno de programación PLCnext Engineer de Phoenix Contact y mediante Eclipse para el desarrollo de librerías en C++. Estas librerías se importan posteriormente en el PLCnext Engineer.

El desarrollo se ha realizado implementando conceptos de la programación orientada a objetos, el estándar ISA-88 y la guía GEMMA para el control de estados.

Para realizar la configuración de los servodrivs, y ajustarlos a la aplicación que les corresponde se utiliza un software propio llamado **SoMove**.

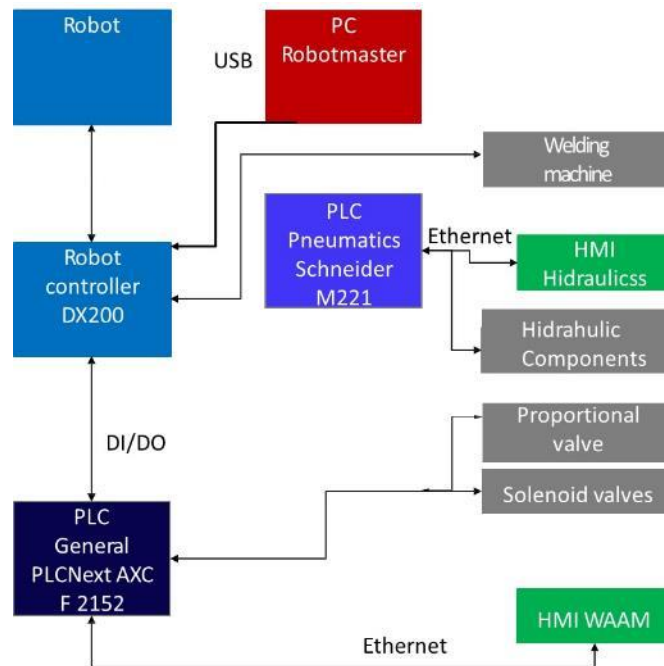
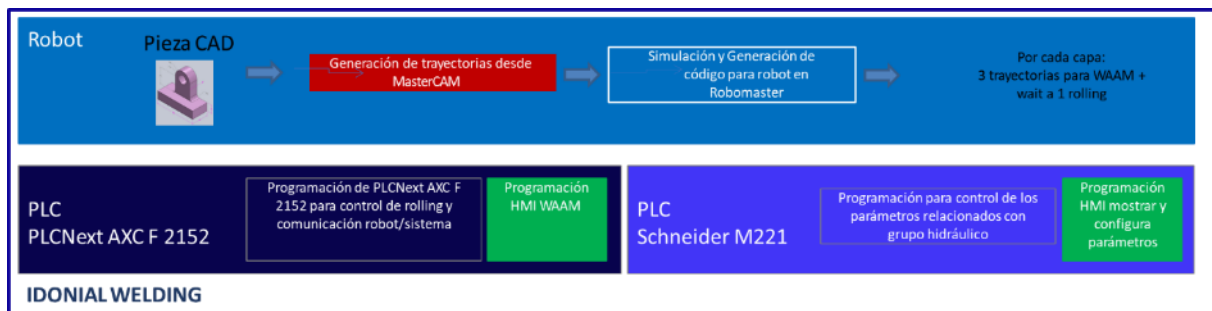
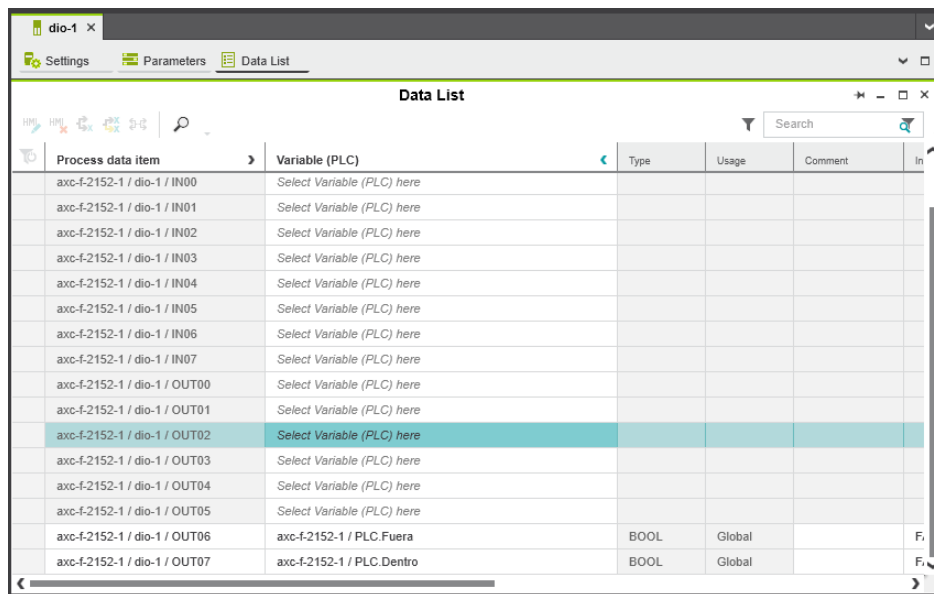


Figura 73. Arquitectura de la programación del micro-laminador

El proceso de laminación tiene dos movimientos principales, uno horizontal realizado mediante dos motores situados sobre las guías lineales y otro vertical, realizado por el cilindro hidráulico. La programación de los procesos de movimientos se puede dividir de igual manera en dos programas diferentes según el movimiento a controlar.



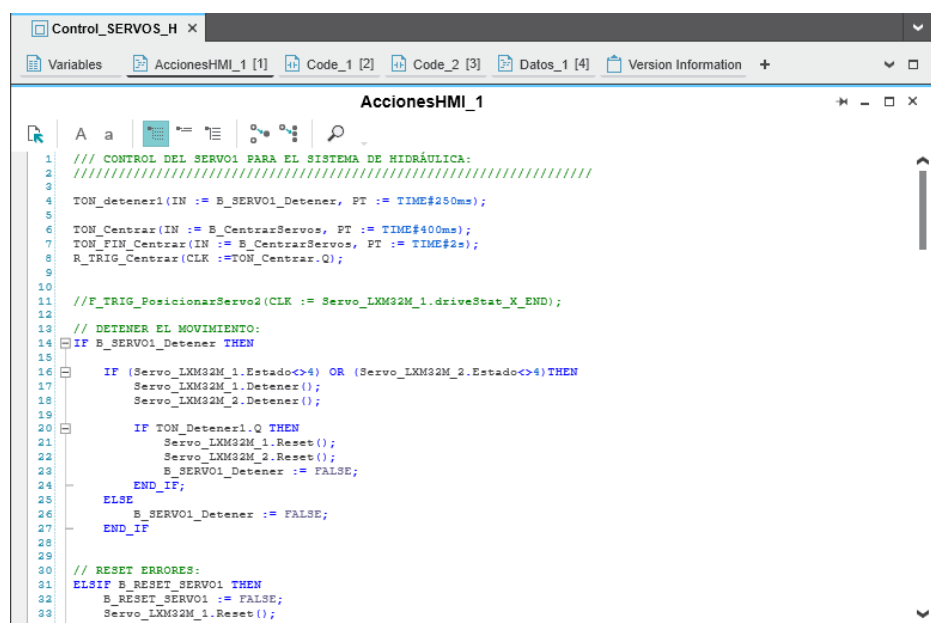
Process data item	Variable (PLC)	Type	Usage	Comment	in
axc-f-2152-1 / dio-1 / IN00	Select Variable (PLC) here				
axc-f-2152-1 / dio-1 / IN01	Select Variable (PLC) here				
axc-f-2152-1 / dio-1 / IN02	Select Variable (PLC) here				
axc-f-2152-1 / dio-1 / IN03	Select Variable (PLC) here				
axc-f-2152-1 / dio-1 / IN04	Select Variable (PLC) here				
axc-f-2152-1 / dio-1 / IN05	Select Variable (PLC) here				
axc-f-2152-1 / dio-1 / IN06	Select Variable (PLC) here				
axc-f-2152-1 / dio-1 / IN07	Select Variable (PLC) here				
axc-f-2152-1 / dio-1 / OUT00	Select Variable (PLC) here				
axc-f-2152-1 / dio-1 / OUT01	Select Variable (PLC) here				
axc-f-2152-1 / dio-1 / OUT02	Select Variable (PLC) here				
axc-f-2152-1 / dio-1 / OUT03	Select Variable (PLC) here				
axc-f-2152-1 / dio-1 / OUT04	Select Variable (PLC) here				
axc-f-2152-1 / dio-1 / OUT05	Select Variable (PLC) here				
axc-f-2152-1 / dio-1 / OUT06	axc-f-2152-1 / PLC.Fuera	BOOL	Global		F.
axc-f-2152-1 / dio-1 / OUT07	axc-f-2152-1 / PLC.Dentro	BOOL	Global		F.

Figura 74. Captura de las salidas del PLC, en este caso, las ordenes de meter y sacar el cilindro (Dentro y Fuera)

## Programa motores sobre guías lineales

Las guías lineales son las encargadas de realizar el movimiento horizontal durante el proceso de laminación. En el programa de control correspondiente se tienen los controles y ajustes pertinentes para los dos motores. El sistema debe y tiene que ser capaz de mover los dos motores en paralelo para que el sistema mecánico no falle, por lo que en la programación se envían las ordenes de las diferentes acciones a los dos motores en un mismo programa y en líneas consecutivas, para así, poder garantizar un funcionamiento simultáneo.

Se tienen tres acciones que controlan los estados de los servos de los motores: reseteo de los fallos que estos puedan tener, encendido y apagado de los mismos. Estas acciones son controladas desde la interfaz del usuario mediante unos botones, comunes para ambos servos.

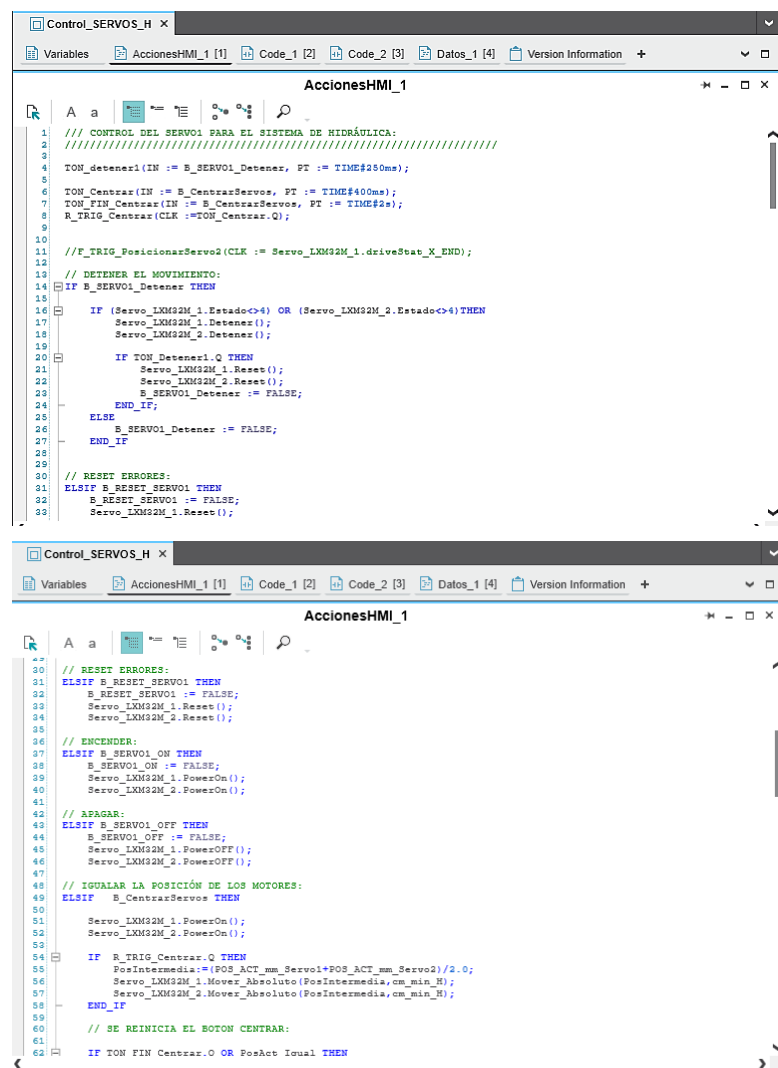


```

1  // CONTROL DEL SERVO1 PARA EL SISTEMA DE HIDRÁULICA:
2  ///////////////////////////////////////////////////////////////////
3
4  TON_detener1(IN := B_SERVO1_Detener, PT := TIME#250ms);
5
6  TON_Centrar(IN := B_CentrarServos, PT := TIME#400ms);
7  TON_FIN_Centrar(IN := B_CentrarServos, PT := TIME#2s);
8  R_TRIG_Centrar(CLK :=TON_Centrar.Q);
9
10
11
12 //F_TRIG_PosicionarServo2(CLK := Servo_LXM32M_1.driveStat_X_END);
13 // DETENER EL MOVIMIENTO:
14 IF B_SERVO1_Detener THEN
15
16     IF (Servo_LXM32M_1.Estado<4) OR (Servo_LXM32M_2.Estado<4) THEN
17         Servo_LXM32M_1.Detener();
18         Servo_LXM32M_2.Detener();
19
20     IF TON_Detener1.Q THEN
21         Servo_LXM32M_1.Reset();
22         Servo_LXM32M_2.Reset();
23         B_SERVO1_Detener := FALSE;
24     END_IF;
25 ELSE
26     B_SERVO1_Detener := FALSE;
27 END_IF
28
29
30 // RESET ERRORES:
31 ELSIF B_RESET_SERVO1 THEN
32     B_RESET_SERVO1 := FALSE;
33     Servo_LXM32M_1.Reset();
    
```

Figura 75. Programación de la sincronización de los motores

Aun habiéndose programado el movimiento de los motores para que funcionen de manera paralela, estos pueden des-coordinarse debido a factores externos, como pueden ser fuerzas externas, rozamientos, discontinuidades en el perfil de laminación, entre otros, por lo que puede producirse un cierto desfases entre un motor y otro. Por este motivo, se ha optado por añadir un sistema de parada de seguridad, el cual hace que los motores se detengan y no permitan el movimiento de estos en el caso en el que se exceda una determinada posición relativa entre ellos, estando esta prefijada en 1.5mm, pudiéndose ajustar en cualquier momento. En caso de haber saltado la alarma de exceso de desfase, los motores se detienen instantáneamente y, únicamente se van a poder volver a poner en movimiento en caso de enviar la acción de centrar los motores, la cual sitúa estos en el punto intermedio de sus posiciones relativas.



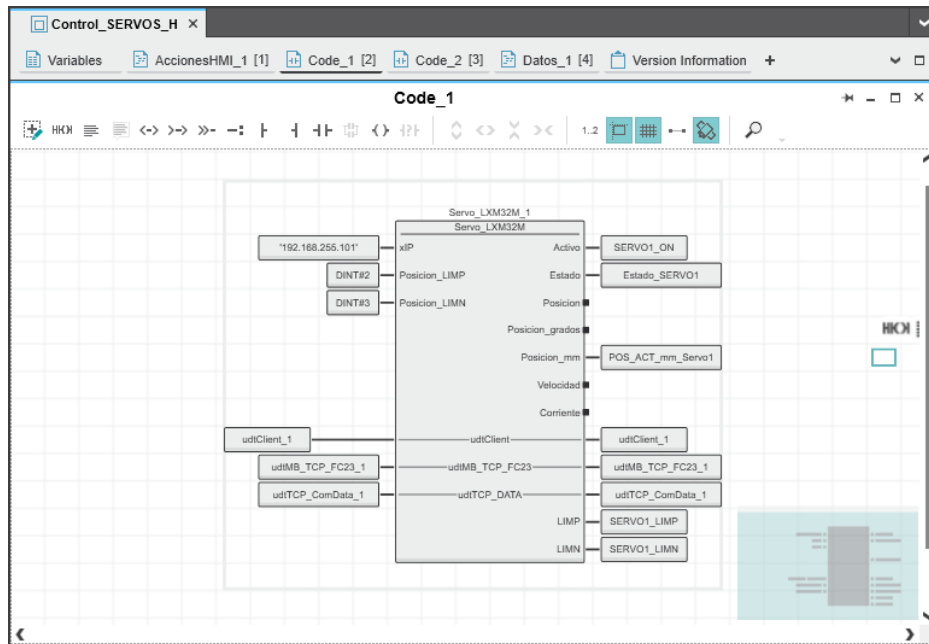
```

1  // CONTROL DEL SERVO1 PARA EL SISTEMA DE HIDRÁULICA:
2  ////////////////////////////////////////////////////////////////////
3
4  TON_detener1(IN := B_SERVO1_Detener, PT := TIME#250ms);
5
6  TON_Centrar(IN := B_CentrarServos, PT := TIME#400ms);
7  TON_FIN_Centrar(IN := B_CentrarServos, PT := TIME#2s);
8  R_TRIG_Centrar(CLK :=TON_Centrar.Q);
9
10
11 //F_TRIG_PosicionarServo2(CLK := Servo_LXM32M_1.driveStat_X_END);
12
13 // DETENER EL MOVIMIENTO:
14 IF B_SERVO1_Detener THEN
15
16 IF (Servo_LXM32M_1.Estado<>4) OR (Servo_LXM32M_2.Estado<>4)THEN
17     Servo_LXM32M_1.Detener();
18     Servo_LXM32M_2.Detener();
19
20 IF TON_detener1.Q THEN
21     Servo_LXM32M_1.Reset();
22     Servo_LXM32M_2.Reset();
23     B_SERVO1_Detener := FALSE;
24
25 ELSE
26     B_SERVO1_Detener := FALSE;
27
28 END_IF
29
30 // RESET ERRORES:
31 ELSIF B_RESET_SERVO1 THEN
32     B_RESET_SERVO1 := FALSE;
33     Servo_LXM32M_1.Reset();
34     Servo_LXM32M_2.Reset();
35
36 // ENCENDER:
37 ELSIF B_SERVO1_ON THEN
38     B_SERVO1_ON := FALSE;
39     Servo_LXM32M_1.PowerOn();
40     Servo_LXM32M_2.PowerOn();
41
42 // APAGAR:
43 ELSIF B_SERVO1_OFF THEN
44     B_SERVO1_OFF := FALSE;
45     Servo_LXM32M_1.PowerOFF();
46     Servo_LXM32M_2.PowerOFF();
47
48 // IGUALAR LA POSICIÓN DE LOS MOTORES:
49 ELSIF B_CentrarServos THEN
50     Servo_LXM32M_1.PowerOn();
51     Servo_LXM32M_2.PowerOn();
52
53
54 IF R_TRIG_Centrar.Q THEN
55     PosIntermedia:=(POS_ACT_mm_Servo1*POS_ACT_mm_Servo2)/2.0;
56     Servo_LXM32M_1.Mover_Absoluto(PosIntermedia,cm_min_M);
57     Servo_LXM32M_2.Mover_Absoluto(PosIntermedia,cm_min_M);
58
59 END_IF
60
61 // SE REINICIA EL BOTON CENTRAR:
62 IF TON_FIN_Centrar.O OR PosAct Igual THEN
    
```

Figura 76. Capturas de la programación del CONTROL de los motores

Adicionalmente, y en relación al problema anterior descrito, también se puede dar el caso en el que, por algún motivo, uno de los motores se encuentra encendido y el otro apagado, lo que haría que tras enviarle una orden de movimiento, uno se desplazara y el otro se mantuviera apagado, provocando posiblemente un daño mecánico, por lo que, adicionalmente se ha añadido otro sistema de seguridad. Este nuevo sistema de seguridad consiste en detener los servos siempre y cuando el estado de encendido/apagado de estos sea diferente entre ellos durante un periodo que exceda los 500ms, asegurándose de esta manera que los servomotores únicamente se puedan mover si están

ambos encendidos. En el caso en el que el estado de los servos sea diferente, sale un indicador de alerta en la interfaz del usuario.



Para llevar un control del desfase que se produce durante el movimiento en los dos motores, se puede ver en la interfaz del usuario el máximo desfase que se ha producido, pudiendo ponerse este a cero mediante el correspondiente botón. Esto va a permitir tener una mayor supervisión sobre el proceso que se está llevando a cabo y viendo así, si puede haber algún desajuste mecánico en el sistema, por ejemplo.

Los movimientos principales que se pueden realizar son desplazamientos relativos y absolutos, pudiéndose ajustar la velocidad y el valor de estos desde la interfaz del usuario. También se dispone de unos pulsadores en la interfaz del usuario que permiten mover los motores en el sentido correspondiente a la velocidad indicada hasta que estos se dejan de pulsar.

Al mismo tiempo, se dispone de diferentes posiciones predefinidas a las que se puede desplazar el sistema de forma automática si se envían las órdenes correspondientes. Unas posiciones predefinidas son fijas, los límites positivos y negativos de las guías lineales, y otras deben ser ajustadas por el usuario desde la interfaz, que son las posiciones inicial y final del proceso de laminación.

Para el control de estos servomotores se ha tenido que crear una librería, agrupada en este objeto, que realice la comunicación mediante Modbus TCP, ya que en *PLCnext* no existen aún librerías de control estándar como la "PLCOpen Motion Control".

El funcionamiento se basa en la creación de un cliente Modbus TCP y el uso de la función de control FC23, que permite la lectura y escritura de varios registros. Como punto de partida se utiliza la librería de *Phoenix Contact* "Modbus\_TCP\_8", descargable desde la [PLCnext Store](#).

La comunicación se realiza gracias a la funcionalidad "I/O Scanning" de Modbus TCP, mediante la que se puede controlar completamente el servomotor utilizando 13 palabras dobles (16 bits) de lectura y 13 de escritura.

**Escritura:**

Byte	Name	Parameter address
0 ... 3	PCTRLms	-
4 ... 7	PVms	-
8 ... 9	dmControl	-
10 ... 13	RefA32	-
14 ... 17	RefB32	-
18 ... 21	Ramp_v_acc	Parameter Ramp_v_acc, Modbus 1556
22 ... 25	Ramp_v_dec	Parameter Ramp_v_dec, Modbus 1558
26 ... 29	EthOptMapOut1	Parameter EthOptMapOut1, Modbus 17500
30 ... 33	EthOptMapOut2	Parameter EthOptMapOut2, Modbus 17502
34 ... 37	EthOptMapOut3	Parameter EthOptMapOut3, Modbus 17504

**Lectura:**

Byte	Name	Parameter address
0 ... 3	PCTRLsm	-
4 ... 7	PVsm	-
8 ... 9	driveStat	-
10 ... 11	mfStat	-
12 ... 13	motionStat	-
14 ... 15	driveInput	-
16 ... 19	_p_act	Parameter _p_act, Modbus 7706
20 ... 23	_v_act	Parameter _v_act, Modbus 7744
24 ... 25	_I_act	Parameter _I_act, Modbus 7686
26 ... 29	EthOptMapInp1	Parameter EthOptMapInp1, Modbus 17512
30 ... 33	EthOptMapInp2	Parameter EthOptMapInp2, Modbus 17514
34 ... 37	EthOptMapInp3	Parameter EthOptMapInp3, Modbus 17516

Mediante los registros dmControl, RefA32 y RefB32 se puede controlar el funcionamiento de los motores, ya que permite gestionar los estados y los modos de operación predefinidos siguiendo la documentación.

Para tener control completo de todas las variables que se comparten mediante Modbus TCP se pueden utilizar los registros PCTRLms y PVms.

Los métodos incluidos en el bloque funcional se encargan de sobrescribir los registros de salida para ordenar las acciones correspondientes.

### Programa cilindro hidráulico

El cilindro hidráulico es el componente mecánico principal encargado de realizar la operación de laminación, está gobernado mediante un controlador de presión, conectado a su vez a un grupo hidráulico, cedida por la unidad de mecánica estructural.

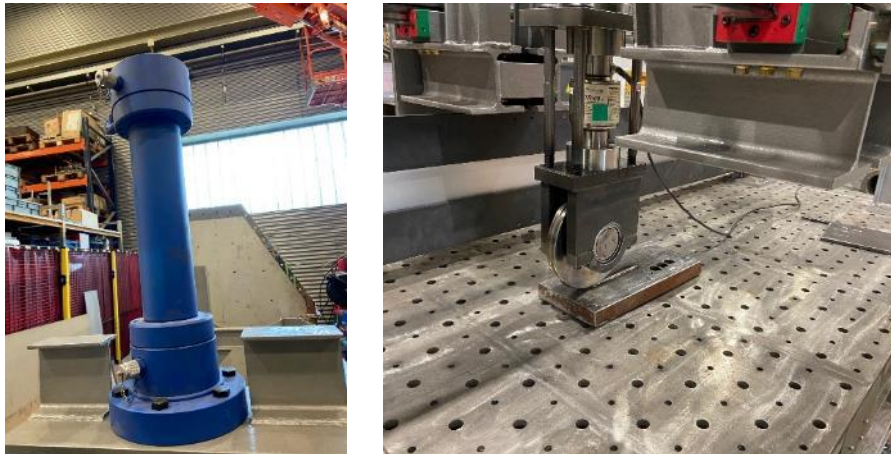


Figura 77. Sistema cilindro hidráulico, célula de carga y rodillo de laminación.

Los componentes principales tenidos en consideración a la hora de realizar la programación del sistema hidráulico han sido: un **sensor de presión** (Figura 78) que permite saber la presión a la que se encuentra el fluido a la entrada del cilindro; una **válvula proporcional** (Figura 78), se encarga de enviar la consigna desde el PLC al sistema para conseguir la presión deseada, es decir, se encarga de regular la fuerza ejercida por el cilindro una vez entra en contacto con la superficie sobre la que se desea trabajar, toma valores entre  $0V_{CC}$  y  $10V_{CC}$ ; por último, se tiene una **electroválvula** de 3 posiciones y 5 vías controlada mediante 2 solenoides, que tienen la función de recoger o extender el vástago del cilindro.



Figura 78. Control sistema hidráulico.

Para extraer o introducir el vástago del cilindro únicamente hay que enviar una señal de  $24V_{CC}$  al solenoide correspondiente de la electroválvula para realizar la acción deseada. En caso de querer detener el movimiento del vástago, se envían  $0V_{CC}$  a ambos solenoides. Los solenoides de la electroválvula deben estar enclavados, es decir, nunca deben activarse ambos a la vez, lo cual se ha tenido en cuenta a la hora de realizar la programación.

A la hora de programar el proceso también se ha tenido en cuenta que el control de fuerza del cilindro sólo debe realizarse cuando el cilindro está en contacto con la superficie sobre la que se desea ejercer la fuerza. Por este motivo, cada vez que el usuario envía al sistema una orden de realizar la operación de recoger o extender el vástago del cilindro, el valor de la consigna de la válvula proporcional se va a reinicia a  $0V_{CC}$ , de esta manera se va a evitar un contacto brusco entre el rodillo y la superficie a trabajar.

Todos los controles del cilindro hidráulico, como movimientos y valores de la válvula proporcional, se hacen desde la interfaz del usuario de manera muy fácil e intuitiva.

### Interfaz del usuario

Tal como se ha comentado anteriormente, para operar con la planta se utiliza un panel web WP 4120-WXPS, que accede a la dirección IP del PLC y muestra la interfaz creada desde el PLCnext Engineer.

La interfaz gráfica del usuario está dividida en 3 pantallas diferentes, Figura 79, que van indicando los pasos a seguir para realizar el proceso de laminación, que son:

1. Ajuste del recorrido que va a realizar el cilindro
2. Pruebas de funcionamiento del cilindro hidráulico
3. Proceso de laminación

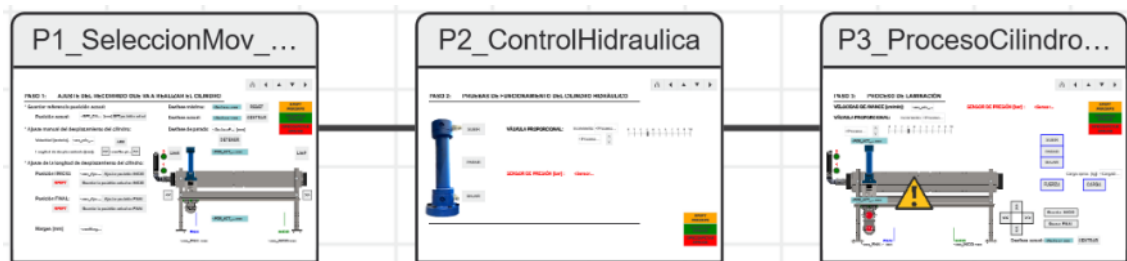


Figura 79. Estructura pantallas interfaz del usuario.

Dichas pantallas se describen a continuación:

#### Ajuste del recorrido que va a realizar el cilindro

Desde esta pantalla se van a hacer todas las comprobaciones y configuraciones del movimiento horizontal.

El primer paso a realizar antes de iniciar el proceso completo de laminación es hacer una serie de ajustes del movimiento lineal. Es recomendable que, antes de guardar ninguna posiciones predefinidas ajustables del proceso, se lleve el sistema al límite positivo o negativo para tomar este como punto 0 de referencia, a partir de aquí ya se pueden guardar las posiciones de inicio y final del proceso de laminación.

Se permite guardar las posiciones de referencia, hacer movimientos absolutos y relativos, así como guardar las posiciones iniciales y finales del proceso.

Se incluye también un control visual y control del proceso y de los desfases entre motores.

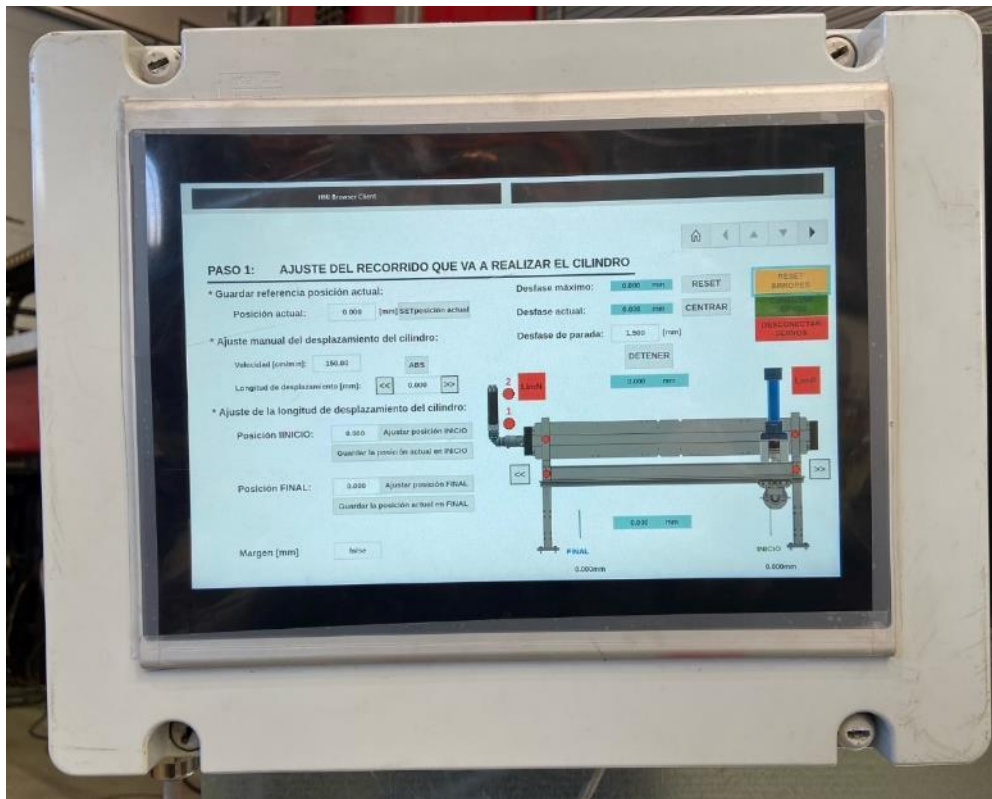


Figura 80. Pantallazo de la interface correspondiente al primer paso del proceso de micro-laminación: ajuste del recorrido



Figura 81. Pantalla "Ajuste del recorrido que va a realizar el cilindro".

### Pruebas de funcionamiento del cilindro hidráulico

Como segundo paso, se tienen las pruebas de funcionamiento del cilindro hidráulico.

Desde esta pantalla se van a poder hacer pruebas del movimiento vertical del proceso, es decir, controlar el movimiento del cilindro hidráulico y, hacer pruebas de carga.



Figura 82. Pantallazo de la interface correspondiente al segundo paso del proceso de micro-laminación: movimiento del cilindro

En esta pantalla se puede visualizar la presión a la entrada del cilindro hidráulico.



Figura 83. Pantalla “Pruebas de funcionamiento del cilindro hidráulico”.

### Proceso de laminación

Como tercer paso y última pantalla, se tiene el proceso completo de laminación, que engloba el movimiento horizontal, vertical y la aplicación de la carga, uniendo así, en una única pantalla, las dos pantallas anteriores. Desde aquí, se va a tener un control total del proceso.

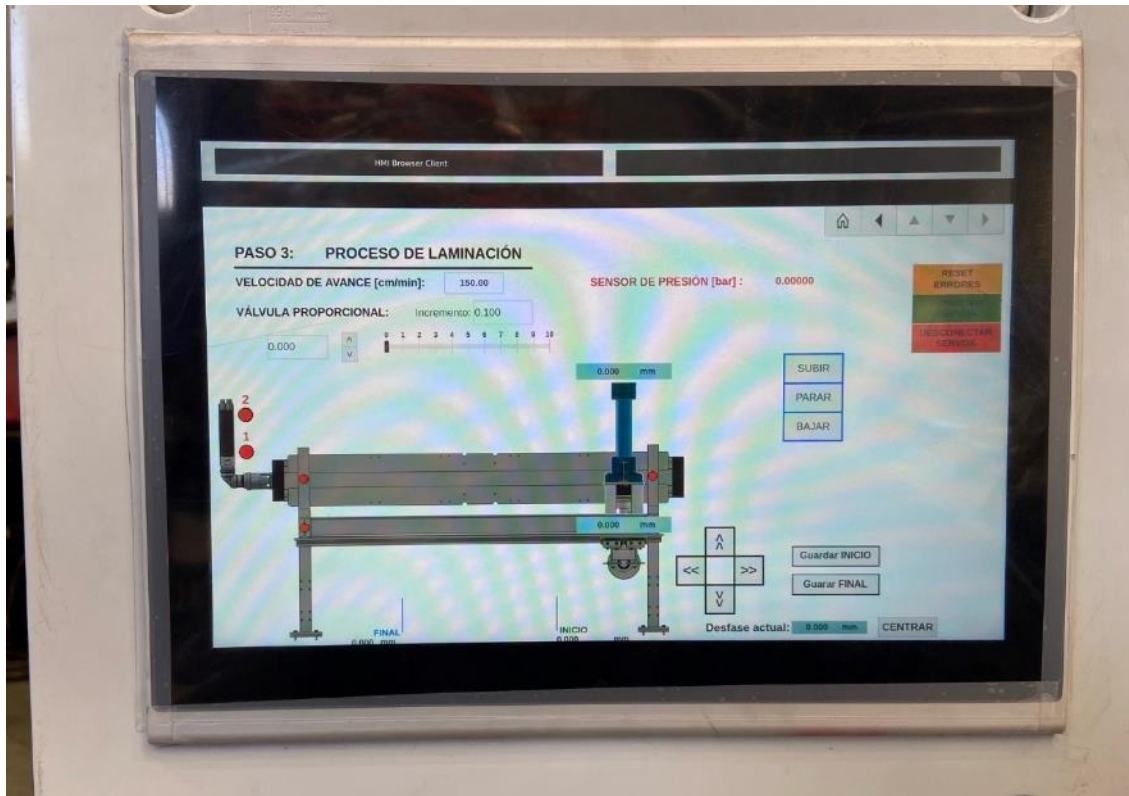


Figura 84. Pantallazo de la interface correspondiente al tercer paso del proceso de la micro-laminación

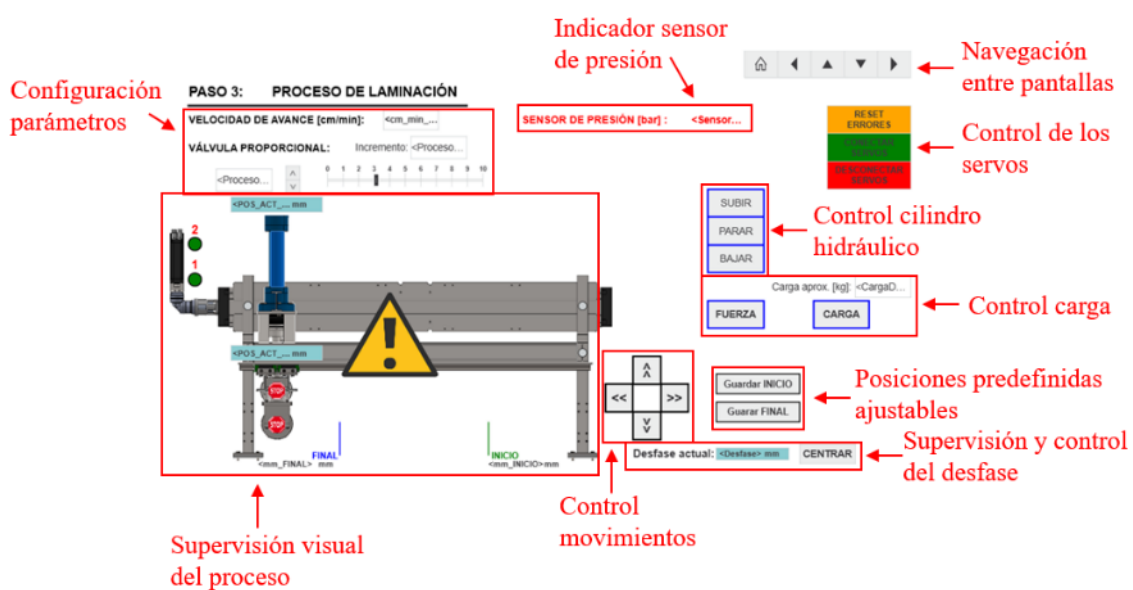


Figura 85. Pantalla "Proceso de laminación".

## Tarea 2. Pruebas de las propiedades mecánicas mediante Rolling

Una vez se ha tenido el prototipo montado y programado, se han hecho unas pruebas iniciales de laminación con acero inoxidable 316L y posteriormente con titanio.

El proceso ha consistido en realizar una pared de soldadura en la que se ha ido laminando cada tres cordones. Los pasos seguidos han sido los mismos en ambos ensayos.

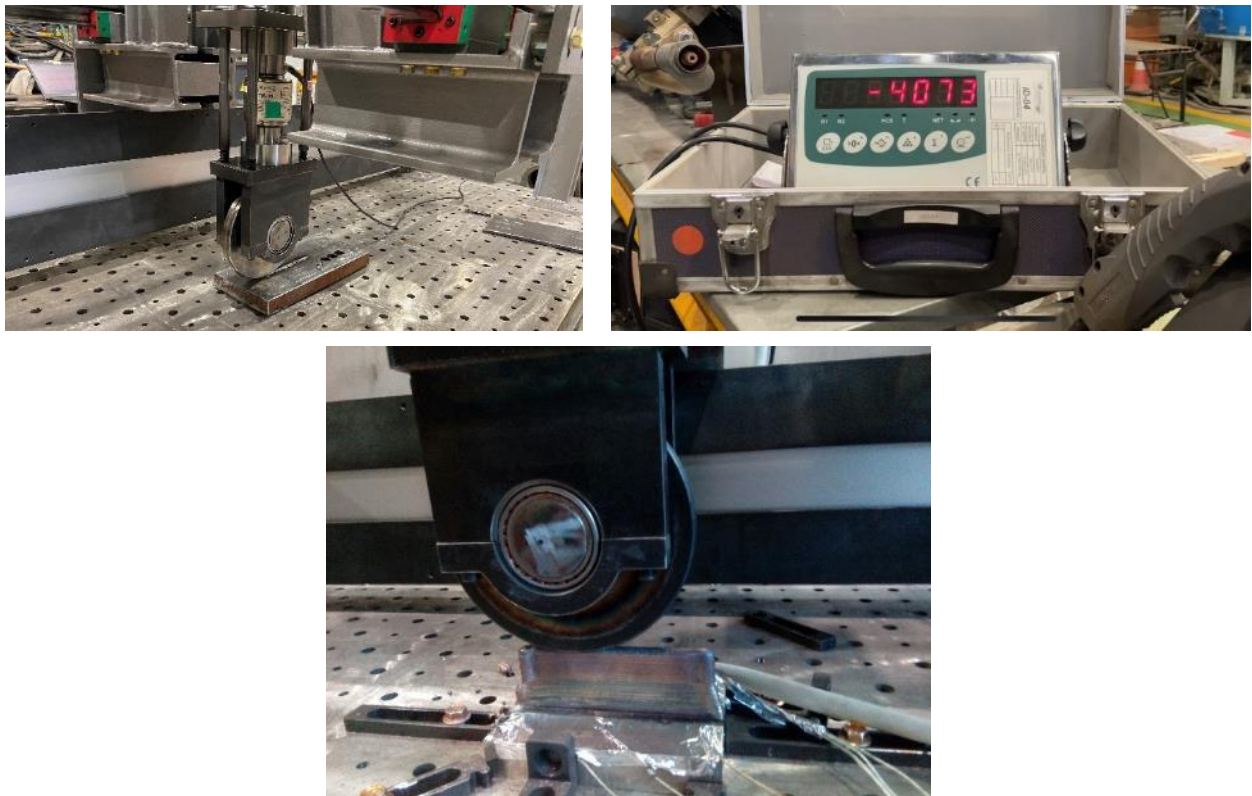


Figura 86. Pruebas de laminación

El primer paso ha consistido en situar y amarrar la pieza en la posición correcta, teniendo en cuenta la trayectoria de laminación que se va a seguir. Una vez situada la pieza, se han ajustado y guardado los puntos inicial y final del proceso de laminación, ajuste del recorrido en la primera pantalla (Figura 80).

Seguidamente, se puede proceder a la realización de la pared de soldadura. Para que el robot tenga espacio suficiente para trabajar, y con el objetivo de que no colisione con el cilindro hidráulico, este último debe ser desplazado una cierta distancia del punto inicial del proceso de laminación, en nuestro caso, ha sido de 400mm.

Una vez retirado el cilindro hidráulico, se ha iniciado la soldadura, dando 3 capas de soldadura. El sentido de los cordones se ha ido alternando entre capas.

Una vez realizados los 3 cordones, se ha iniciado el proceso de laminación. Para ello, con el vástago del cilindro hidráulico recogido, se ha llevado a la posición de inicio del proceso. Una vez situado, se ha extendido el vástago sin aplicar carga hasta que ha entrado en contacto con la pieza, momento a partir del cual se ha empezado a aplicar carga a intervalos de 5kN, hasta alcanzar la carga deseada. La carga aplicada se ha ido comprobando en una pantalla conectada a la célula de carga que tiene el sistema, Figura 86.

Tras alcanzar la carga deseada, se ha desplazado el cilindro hasta la posición final del proceso y se ha retrocedido hasta alcanzar de nuevo el punto inicial, este movimiento se ha realizado un total de 4 veces.

### Ensayo mediante soldadura manual

Este ensayo ha sido realizado para comprobar el buen funcionamiento mecánico del sistema en un proceso real de laminación. Para ello se ha utilizado un bloque de acero inoxidable 316L.

Se han realizado tres pruebas diferentes, en las cuales se han depositado de manera manual 3 capas de un único cordón cada una de ellas. Se ha precalentado la pieza hasta alcanzar los 300°C y se ha utilizado una corriente de soldadura de 150A.

La carga aplicada durante la laminación de las tres pruebas ha sido de aproximadamente 35kN y su velocidad de avance ha sido de 125cm/min, únicamente se ha laminado un tramo del cordón para posteriormente comparar la soldadura con y sin laminación. El rodillo utilizado en las tres pruebas ha sido el de perfil de ranura.

En las siguientes imágenes se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas.

En la Figura 87 se muestran los resultados obtenidos en la pruebas 1 y 2. De cada una de ellas se han extraído probetas para dos ensayos macrográficos siendo M1 y M2 la probeta laminada y sin laminar de la prueba 1, y M3 y M4 la probeta laminada y sin laminar de la prueba 2.

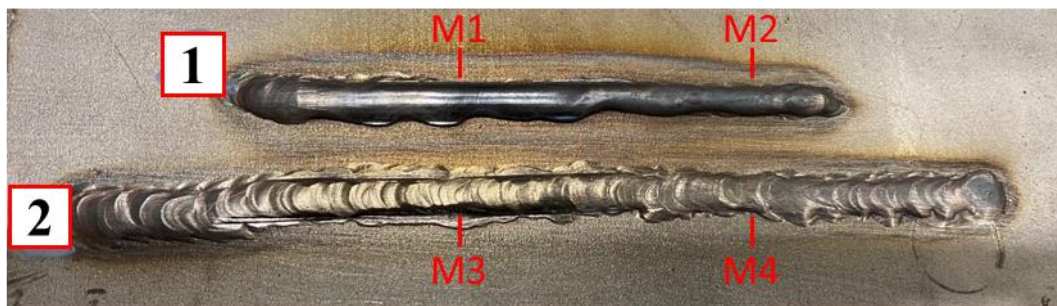


Figura 87. Pruebas 1 y 2 ensayo AISI 316L (acero inoxidable). M1 y M3 probetas laminadas, y M2 y M4 sin laminar.

En la Figura 88 se muestra la zona de extracción de las probetas M5, sin laminar y M6, laminada correspondientes a la prueba 3.



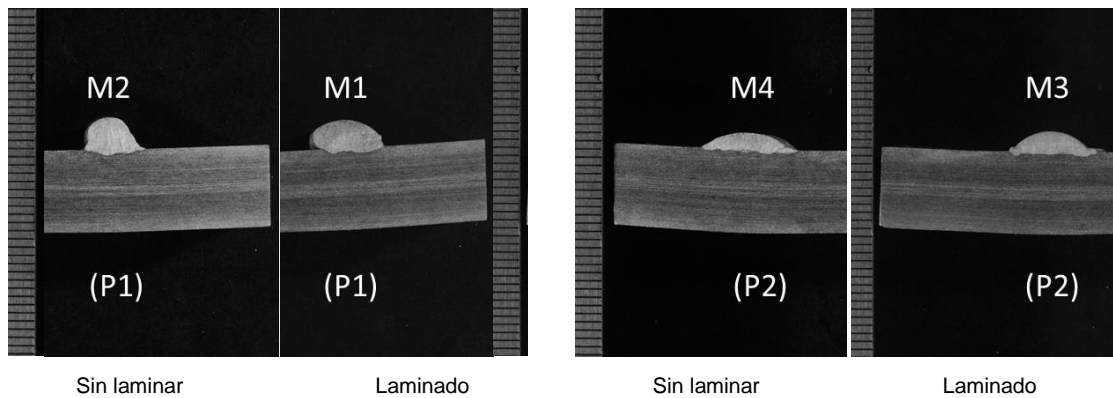
Figura 88. Pruebas 3 ensayo aluminio 316L.

En la siguiente figura, Figura 89, se puede ver en detalle la diferencia, geoméricamente hablando, de tres cordones sometidos y sin someterse al proceso de laminación.



Figura 89. Detalle cordón.

Los resultados de los ensayos macrográficos correspondientes a las pruebas 1 y 2, sin laminar y laminados se muestran en la Figura 90. Los resultados correspondientes al ensayo 3 se muestran en la Figura 91.



Resultados de los ensayos macrográficos de la prueba 1      Resultados de los ensayos macrográficos de la prueba 2

Figura 90. Ensayos macrográficos de las 2 primera pruebas con AISI 316L

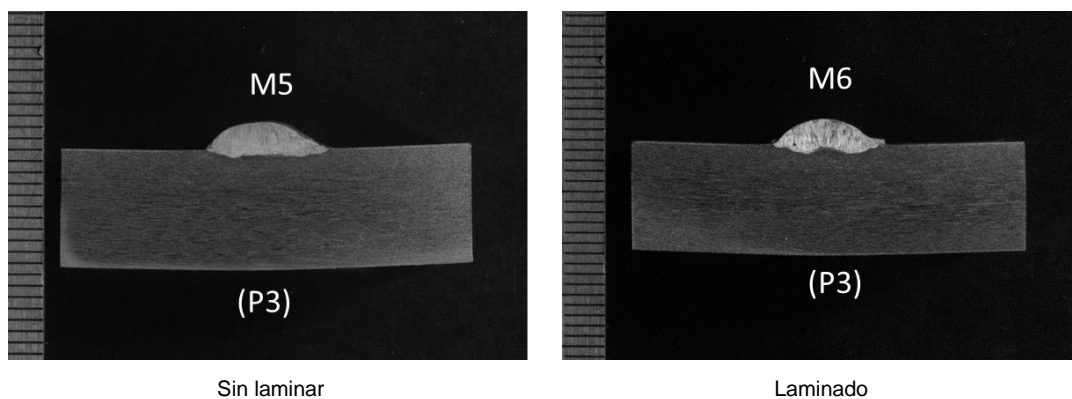


Figura 91. Ensayos macrográficos de tercera prueba con AISI 316L

Los resultados de los ensayos micrográficos correspondientes a la prueba 3 (Figura 92 sin laminar, y Figura 93 con laminación) muestran una ferrita columnar en una matriz austenítica, modo de

solidificación que ocurre a altas temperaturas, con un crecimiento epitaxial con granos columnares y alargados donde los granos crecen en dirección del flujo de calor.

Comparando la microestructura antes y después de la laminación se observa un leve afinado de grano y no se observan daños alrededor de los precipitados. Es habitual que en microestructuras que han sufrido una elevada deformación en frío aparezca oquedades alrededor de los carburos precipitados como consecuencia de que estos últimos son mucho más duros que la matriz.



Figura 92. Micro sin laminación: M5, prueba 3, (x50)

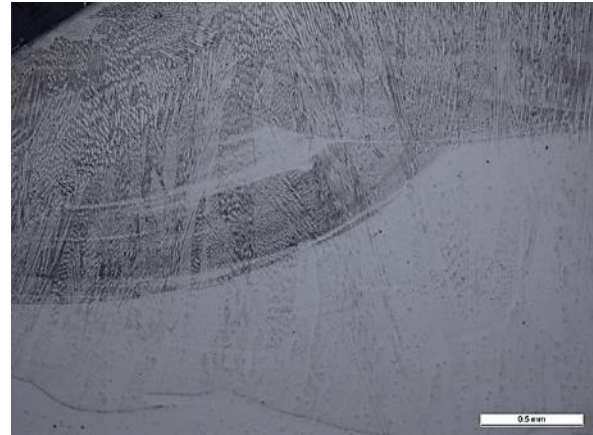


Figura 93. Micro con laminación: M6, prueba 3, (x50)

Sobre las probetas donde se obtuvo la macrografía se realizaron los ensayos de dureza Vickers HV1 que se realizaron de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 6507-1:2018.

En las probetas metalográficas, se realizarán mediciones de durezas dónde se ha considerado adecuado en función de la longitud, altura y espesor de pared, en este sentido se ha realizado una línea de durezas vertical en ambas muestras la referencia, M5 corresponde con la muestra de soldadura sin laminar y la muestra M6 corresponde con la muestra laminada.

A la vista de los resultados de la caracterización mecánica realizada a las pruebas, el efecto observado es el correspondiente a una laminación en frío, probablemente debido a que el lapso de tiempo transcurrido entre la soldadura manual y la laminación ha sido excesivo. Es por ello de vital importancia tratar de automatizar el proceso y reducir el tiempo entre la soldadura y la laminación.

En la Figura 94 y en la Figura 95 se muestran las durezas antes y después de la laminación. Se observa un claro endurecimiento por deformación, el proceso de aumento de resistencia de un metal por deformación plástica.

M5 Sin laminar	
HUELLA	HV1
1	185
2	198
3	182
4	193
5	201
6	185
7	205
8	195
9	199
10	194

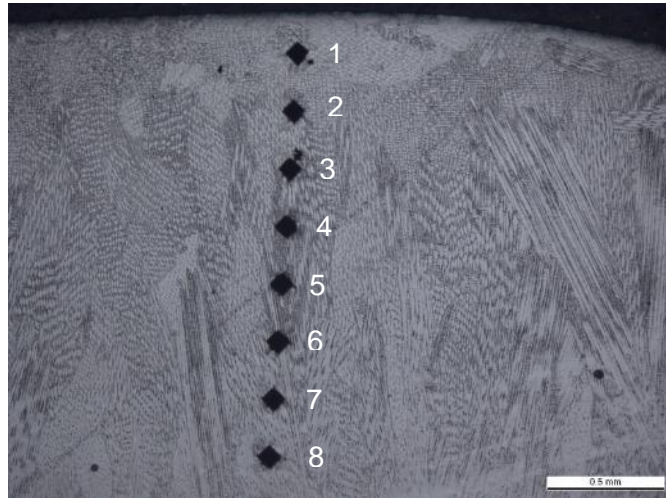


Figura 94. Durezas obtenidas en la probeta M5, AISI 316L sin laminar

M5 laminada	
HUELLA	HV1
1	307
2	268
3	251
4	246
5	230
6	205
7	228
8	234
9	226
10	227

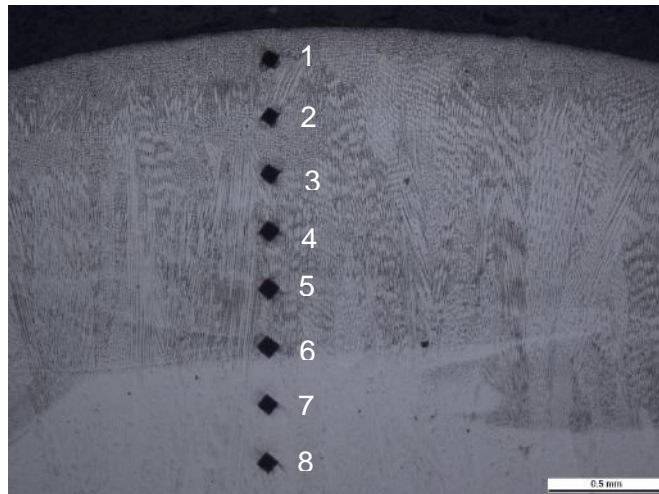


Figura 95. Durezas obtenidas en la probeta M6, AISI 316L laminada.

### Ensayo mediante soldadura robotizada

Para la realización de las pruebas se ha hecho uso de un robot de soldadura HP20D-6, una controladora DX100 ambos de YASKAWA de Yaskawa Motoman, una fuente de soldadura GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) MagicWave 5000 de FRONIUS® y algunos equipos auxiliares necesarios como posicionadores y viradores.

Las pruebas fueron realizadas con el consumible Ti6Al4V de Böhler de 1 mm de diámetro sobre una chapa laminada también de Ti6Al4V. El gas de protección que utilizado ha sido el argón (99,99%).

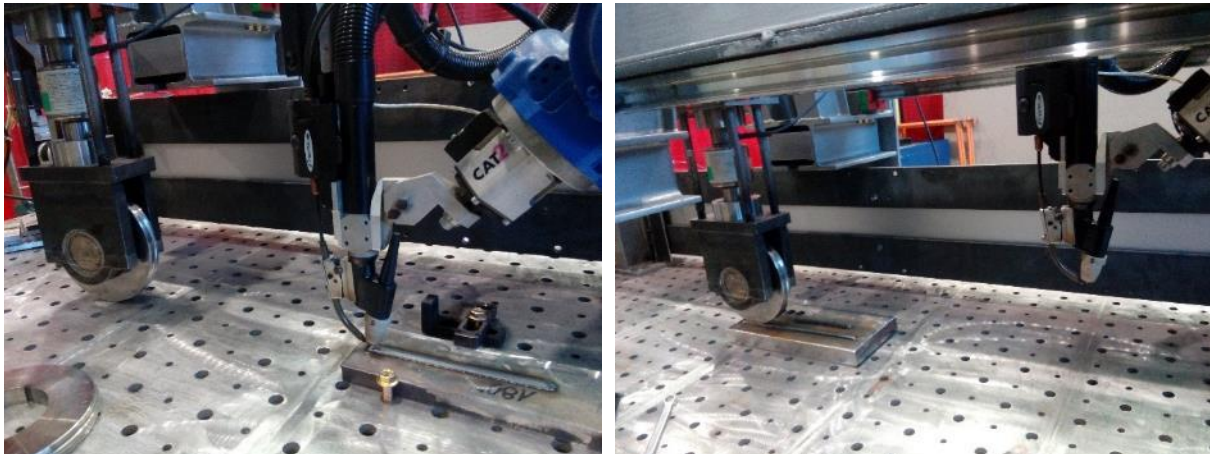


Figura 96. Ensayo con robot de soldadura.

En total se han realizado tres pruebas diferentes (40, 41, 42), y han consistido en realizar paredes mediante la deposición de una capa de soldadura encima de otra. Cada capa está formada por dos cordones en paralelo.

De nuevo, se ha utilizado el rodillo de perfil en ranura para realizar la laminación, excepto en la tercer prueba.

La **primera prueba** de laminación con Ti (**P40**) se ha realizado sobre una chapa de 15mm de espesor de material dúplex 2205, con un aporte de Ti6Al4V de 1mm diámetro. Se ha utilizado una corriente de soldadura de 184A con una velocidad de aporte de hilo de 1.4m/min y una velocidad lineal de desplazamiento de 30cm/min. A la hora de proceder a la laminación, se ha aplicado una carga de 30kN a una velocidad de avance de 20cm/min. Al igual que en las pruebas con inoxidable, se han depositado tres capas antes de cada laminación. Una vez laminado el primer conjunto de capas, se ha procedido a realizar el mismo proceso de soldadura y de laminación de forma idéntica.

Para la **segunda prueba** de laminación con Ti (**P41**) se ha utilizado sobre una chapa de titanio con un aporte de soldadura de titanio, ambos grado 5. Se ha utilizado una corriente de soldadura de 165A con una velocidad de aporte de hilo de 1.4m/min y una velocidad lineal de desplazamiento de 30cm/min. Dicha soldadura, al tratarse de titanio, que se oxida en contacto con el aire a temperaturas superiores a los 600 °C (883 K), formando dióxido de titanio, ha sido realizada en una atmósfera protectora de argón. La carga de laminación aplicada ha sido de 30kN a una velocidad de avance de 20cm/min.

A diferencia del ensayo realizado con acero inoxidable 316L, una vez realizada la laminación, no se aprecian marcas en la superficie, sin embargo, se puede ver como la rueda copia las aguas del cordón, dejándolas marcadas en la superficie.

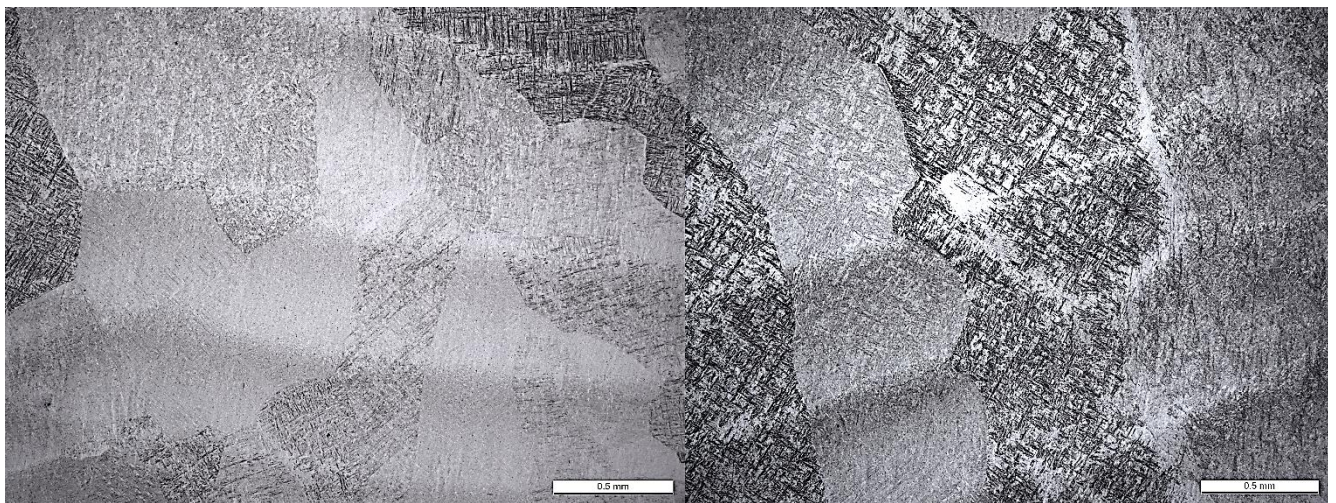
Por último, la **tercera prueba** (**P42**), no ha sido sometida al proceso de laminación. Se parte de una chapa laminada y un hilo de aporte de titanio grado 5. Tanto los valores de la corriente de soldadura, la velocidad de alimentación de hilo y la velocidad de avance son idénticos a la prueba anterior. Adicionalmente, se han añadido sobre la pieza dos termopares, uno al inicio y otro al final de la pared, para tener un registro de la temperatura, para ello se ha utilizado el equipo de *National Instruments*. Se ha levantado una pared de 11mm de altura total mediante capas formadas por dos cordones en paralelo.

El objetivo de la tercera prueba es comparar los resultados con los de la segunda para comprobar si existen diferencias micro-estructurales y o en propiedades mecánicas.

El Ti-6Al-4V como aleación bifásica que contiene 6% en masa de Al que estabiliza la fase  $\alpha$  (HC) y 4% en masa de V que estabiliza la fase  $\beta$  (CC) y dependiendo del tratamiento térmico y del contenido en elementos intersticiales puede presentar diferentes tipos de microestructuras. destacando la equiaxial, la martensítica,

Los resultados de los ensayos micrográficos correspondientes a las pruebas 41 y 42 (Figura 97) muestran consiste en granos equiaxiales de fase  $\alpha$  y placas de Windmanstatten de fase  $\alpha$  de pequeño tamaño. La fase  $\beta$  rodea los granos y las placas de  $\alpha$ .

Comprando la microestructura antes y después de la laminación se observa un leve afino de grano.



Sin laminar (P42)

Laminada P(41)

Figura 97. Resultados de microscopía óptica realizada a las pruebas con titanio

La microestructura con placas de fase  $\alpha$  (Figura 97 sin laminar (P42)) tiene una menor tenacidad y resistencia a fatiga debido a que la grieta es sensible a la microestructura y en general su camino de propagación en granos equiaxiales de fase  $\alpha + \beta$  (Figura 98) es sinuoso debido a que sigue preferencialmente la interfase  $\alpha - \beta$ .

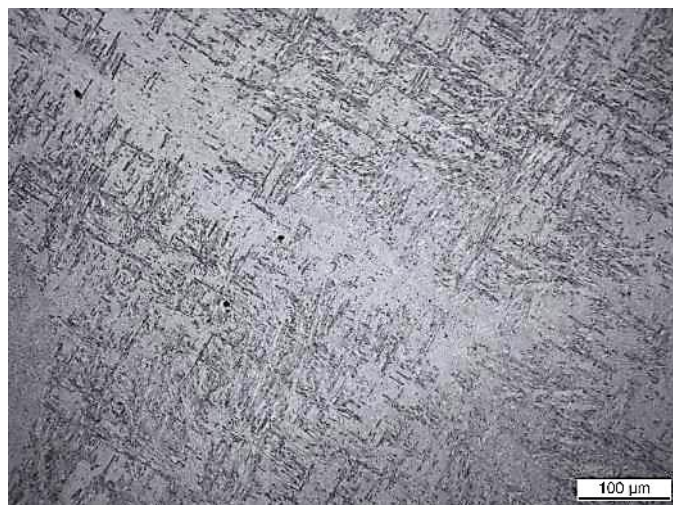


Figura 98. Imagen obtenida por microscopía óptica de la microestructura de la probeta laminada Ti-6 Al-4V (P41).

A pesar del ligero afino conseguido, alcanzando un grano tamaño de grano primario  $\alpha$  de 75-100  $\mu\text{m}$ , no es suficiente para cumplir con las exigencias del sector aeronáutico que exige un tamaño de grano primario  $\alpha \leq 50 \mu\text{m}$  ( $\geq$  ASTM E112 tamaño No 6) en cualquier dirección. El tamaño de grano previo- $\beta$  debe ser inferior a 5 mm.

Para poder realizar la caracterización mecánica del titanio laminado, se ha realizado una pared de Ti-6 Al-4V sobre una chapa laminada del mismo material.



Figura 99. Dimensiones del Cupón 42 de Ti-6 Al-4V

A la vista de los resultados de la caracterización mecánica realizada a las pruebas, que no consiguen alcanzar el alargamiento mínimo en una de las direcciones, el efecto observado es el correspondiente a una laminación en frío, probablemente debido a que el lapso de tiempo transcurrido entre la soldadura manual y la laminación ha sido excesivo y a que la carga no ha sido suficientemente alta. Es por ello de vital importancia tratar de reducir el tiempo entre la soldadura y la laminación.

ENSAYO DE TRACCIÓN		T2	T3
Diámetro de la probeta (mm)		$\varnothing 5$	$\varnothing 5$
Tamaño de la probeta ( $\text{mm}^2$ )		19.48	19.17
Límite elástico $YS_{0.2}$ (MPa)		948	950
Carga de rotura $S_u$	(kN)	20.48	20.06
	(MPa)	1051	1030
Longitud inicial $L_0$ (mm)		25.0	25.0
Elongación tras rotura (%)		A25.0 mm =7.0	A25.0 mm =4.5

ENSAYO DE IMPACTO: UNE-EN ISO 148-1:2017								
Sample	PV2001451/1				PV2001451/1			
Dimensiones (B x W x L) mm	10 x 10 x 55				10 x 10 x 55			
Tipo de entalla	KV2				KV2			
Temperatura de ensayo (°C)	+20				+20			
Dirección del specimen	Horizontal				Vertical			
Specimen	CH1	CH2	CH3	Mean	CV1	CV2	CV3	Mean
Energía absorbida (J)	28	21	23	24	29	40	16	28

### Tarea 3. Pruebas de mejora del acabado superficial

Uno de los desafíos que surge en la fabricación mediante WAAM es que debido al pobre acabado superficial es necesario un post-procesado de las piezas así obtenidas. Además, las propiedades mecánicas de los componentes fabricados mediante WAAM se ven alteradas, por lo que llevar a cabo tratamientos de este tipo queda totalmente justificado.

Existen diferentes métodos de post-procesado como el mecanizado, pulido, refusión mediante láser, etc.

Inicialmente estaba previsto analizar el uso de un láser de diodo para mejorar el acabado superficial de alguno de los demostradores fabricados en hitos previos. No obstante, el retraso en la recepción del equipo necesario (cabezal láser) así como la imposibilidad de realizar pruebas en instalaciones de terceros como alternativa, todo ello debido a la situación sanitaria acaecida en 2020, ha llevado a profundizar en el estudio de la refusión mediante GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) como método preferente para mejora del acabado superficial en este proyecto,

De esta manera, se han realizado varias pruebas de refusión lateral de una pared vertical con el objetivo de analizar las ventajas que aporta este proceso a la mejora de las propiedades y aspectos superficiales.

Se ha partido de piezas obtenidas mediante WAAM, a base de la deposición de capas muy finas, una encima de la otra, tal como se muestra en la zona de la izquierda de la Figura 101.

Al ver los resultados obtenidos en paredes gruesas, de más de 12mm de espesor (Figura 102), para comprobar que la técnica es aplicable incluso con paredes finas, también se ha trabajado con paredes de 4mm de espesor de AISI 316L (Figura 105).

Se ha comparado el acabado conseguido mediante GTAW sin y con material de aporte, con el alcanzado mediante mecanizado.

La primera técnica ha sido la refusión mediante GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) sin material de aporte. Han sido necesarias varias pruebas hasta determinar los parámetros más adecuados. En la Figura 100 se muestran algunas de las dificultades encontradas, como por ejemplo perforar la pieza si se incide con una corriente demasiado alta. La corriente máxima se ha establecido en los 120A.

En la Figura 101 y en la Figura 105 se observa la notable influencia que genera la aplicación de energía en la zona deseada. El acabado superficial obtenido con los parámetros seleccionados ha sido muy bueno, pero lamentablemente, las deformaciones, tanto en paredes finas (Figura 101) como en paredes gruesas (Figura 102), son inadmisibles. Otra consecuencia ha sido que el material

ha quedado degradado en la zona debido al aporte térmico necesario (Figura 105). Esta técnica no sería válida para piezas sometidas a flexión rotativa (fatiga) por ejemplo, ya que la degradación observada facilita la nucleación de una grieta superficial.



Figura 100. Perforación por problemas durante las pruebas de refusión

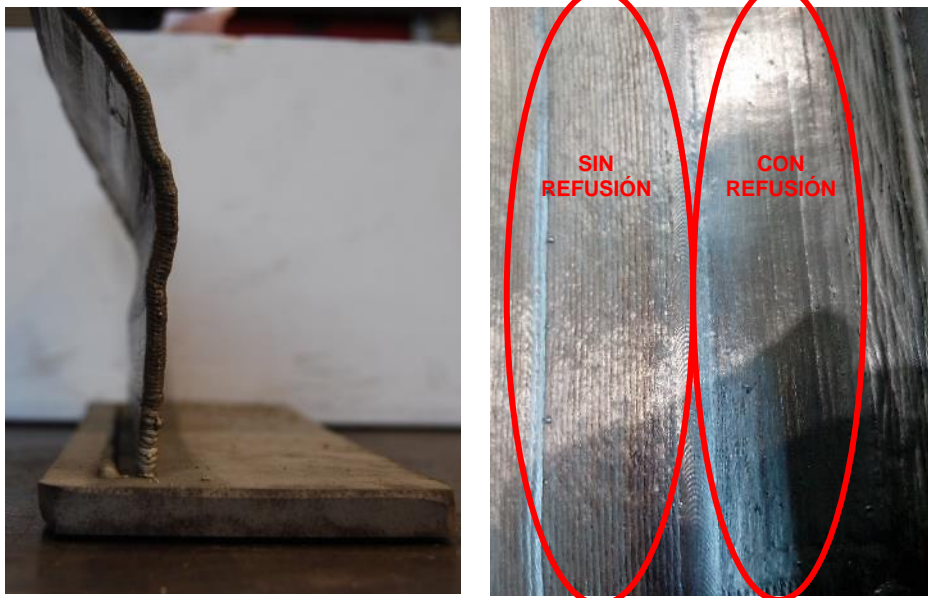


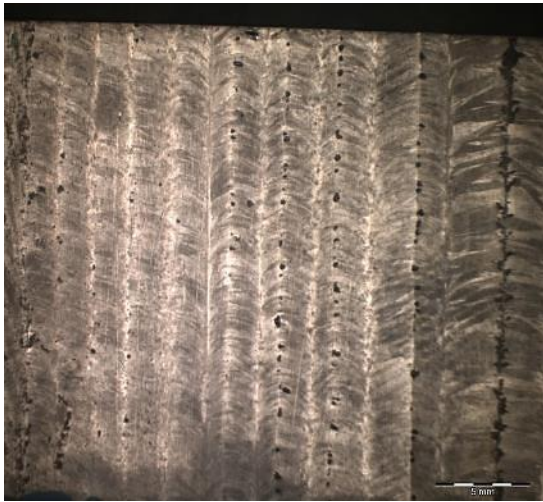
Figura 101. Imágenes tras el proceso de refusión



Figura 102. Macrografía proceso de refusión sobre pared gruesa



Figura 103. Probeta mecanizada por una cara (imagen inferior) para comparación con el acabado obtenido de la soldadura (imagen superior)



Con refusión sin material de aporte

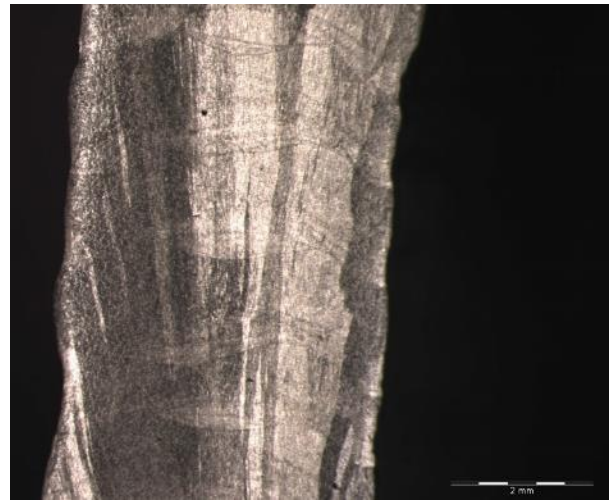


Sin refusión

Figura 104. Observación de la superficie con microscopía óptica



Con refusión sin material de aporte



Sin refusión

Figura 105. Izqu.: Macrografía proceso de refusión. Dcha: Macrografía sin proceso de refusión.

Una vez observados los resultados obtenidos, se ha probado una segunda técnica, GTAW con material de aporte. La mejora del acabado superficial obtenida no ha sido tan buena, pero la zona afectada térmicamente por el proceso no está tan degradada como en las pruebas anteriores (Figura 106).



Figura 106. Macrografía proceso de refusión con material de aporte

En el pasado se han hecho pruebas con GMAW (semiautomática), obteniendo peores resultados con GTAW.

#### **HITO 4. DESARROLLO DE PROTOTIPO DE SISTEMA DE INSPECCIÓN EN LÍNEA POR TERMOGRAFÍA. PRUEBAS INICIALES CON ESPECTROMETRÍA ACÚSTICA**

En el presente Hito de este proyecto, se pretende determinar la aplicación de los distintos métodos de detección de defectos en línea y su implementación en los procesos de fabricación aditiva para poder detectar defectos en tiempo real y proceder a su reparación. De esta manera se consigue maximizar la productividad y minimizar los rechazos de los productos, debido a la disminución de interrupciones. En esta anualidad se han monitorizado las variables relacionadas con el arco de soldadura, y para ello se ha realizado el desarrollo de un sistema de inspección en línea, basado en la técnica de la termografía. La técnica de inspección termográfica se basa en la captación de radiación infrarroja mediante cámaras que enfocan la superficie del cordón de soldadura que deposita el WAAM. En el proceso WAAM, es necesario un control exhaustivo de la geometría y morfología de los defectos que deben medirse inmediatamente después de la deposición. Este análisis se hace por detrás del arco eléctrico de soldadura. La medida de la forma de cara cordón, es necesaria para asegurar que cada pasada depositada es esta situada en el camino predefinido por la programación de la pieza.

Durante esta tarea 4.1 se estudió la viabilidad de un sistema experto de inspección en línea mediante termografía. Para ello, se indujeron defectos en cordones típicos ya predefinidos para WAAM, y se almacenaron las imágenes termográficas correspondientes a los mismos en una base de datos.

Empleándose dicha base de datos y mediante técnicas de análisis de imágenes, se identificaron los defectos más característicos de una soldadura mediante termografía.

Una vez que se identificaron los defectos, se realizaron comparaciones de las imágenes que se obtienen en tiempo real de la cámara termográfica con la base de datos.

Se desarrolló el sistema de comunicación entre el prototipo de inspección por termografía con la celda de fabricación WAAM y con la interfaz de usuario.

Llegados a este punto, según la medición de cada defecto y su catalogación, se pudo valorar la gravedad de cada defecto, en función de los límites asociados a la norma de defectos de soldadura UNE EN ISO 5817, y en el caso de exceder tales límites, el sistema pudo dar orden a la celda de fabricación para detener el arco de soldadura, detener la fabricación, por encontrarse ésta con defectos recientes (en superficie), que no son acordes con los estándares de calidad de fabricación en uniones soldadas y en consecuencia para WAAM.

Mediante un programa externo se realizó una elección de acciones, pudiendo detener el proceso o simplemente enviar una notificación al operador y que sea el mismo el que determine la acción a realizarse.

Las pruebas de defectología en línea se coordinaron con la fabricación de demostradores de Inconel y de Titanio.

## Tarea 1. Desarrollo del prototipo de sistema de inspección en línea por termografía

El sistema principal para la realización del análisis de defectos WAAM por termografía consta de los siguientes sistemas:

- Cámara termográfica adecuada para estudio de soldadura con arco activo.
- Sistema tipo software de gestión de datos y medición sobre los gráficos de señales obtenidos por las termografías.
- Anclajes de adaptación de la cámara a los procesos de soldadura tipo GTAW y tipo GMAW.
- Interface con robot.

En este apartado se comentará el diseño del cabezal realizado, que incluye cámara, los anclajes de la misma al sistema robotizado, compatible con los procesos GTAW y GMAW (incluyendo la versión CMT del mismo).

En esta fase de la actividad se estudiaron las posibles soluciones comerciales de cámaras termográficas para su aplicación en atmosferas industriales similares a las de un taller de soldadura. Se ha tenido en cuenta que la celda de WAAM tendría todos los inconvenientes de una instalación de soldadura, como son la generación de humos, generación de calor, emisión de radiación, proyecciones provocadas por el arco de soldadura, interferencias y/o posibles choques por mal uso de robot, etc. En general las cámaras termograficas son elementos delicados debido a que sus principales componentes ópticos no están diseñados para ambientes industriales severos. Por este motivo las cámaras termográficas para WAAM o soldadura deben tener algunos elementos de protección que permitan su uso en este tipo de entornos de trabajo. Estos elementos de protección son los siguientes:

- Carcasa exterior resistente y modular, para poder sustituir sus partes en caso de deterioro, quemado o colisión.
- Sistema de refrigeración de los componentes eléctricos internos. Normalmente suele usarse una fuente de refrigeración por aire forzado (o una línea de aire comprimido) para la regulación de la temperatura interior de las tarjetas y componentes.
- Carcasa con partes de aluminio extruido en formato de radiador con aleteado interior, que permiten evacuar el calor mediante una fuente de aire forzado por convección.
- Aisladores en las conexiones y anclajes con el robot para evitar posibles derivaciones eléctricas por arco de soldadura, en un supuesto contacto fortuito y cortocircuito producido por el mismo.
- Pantalla física (tipo visera) de protección de las lentes para evitar impacto de proyecciones de soldadura y desvío de gases de soldeo.
- Cortina de aire comprimido que funciona como escudo en la lente, para evitar cualquier impacto de una proyección, evacuar los humos de soldadura y al mismo tiempo reducir la temperatura localmente en las inmediaciones de la óptica.

Otras características que la cámara ha de cumplir es la posibilidad de trabajar en distintos rangos de temperatura con precisión de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ . En concreto se considera adecuado realizar mediciones en los rangos de temperatura baja de  $50^{\circ}\text{C}$ - $275^{\circ}\text{C}$ , temperatura media de  $275$ - $600^{\circ}\text{C}$  y temperatura alta de  $600^{\circ}\text{C}$ - $1200^{\circ}\text{C}$ . En este último caso la incertidumbre asociada a la medición se cifra en  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

El sistema ha de contar con una cámara inteligente que se integre con un software para visionado en tiempo real y almacenamiento de secuencias termográficas. La cámara debe tener una fuente de alimentación externa que permita reducir en cabeza el peso del robot. Adicionalmente se prefiere aplicar un sistema de comunicaciones y conexionado basado en comunicación Ethernet para realización del control mediante PC portátil, externo. La conexión vía Ethernet permite una velocidad de transmisión de 1 Gbit/s, está orientada a nivel de control de red industrial y permite la integración de dispositivos diversos.

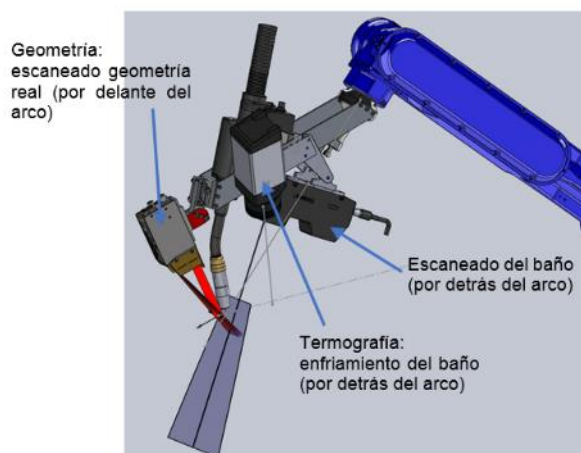


Figura 107. Diseño de sistema de detección de defectología por termografía para proceso GMAW-CMT.

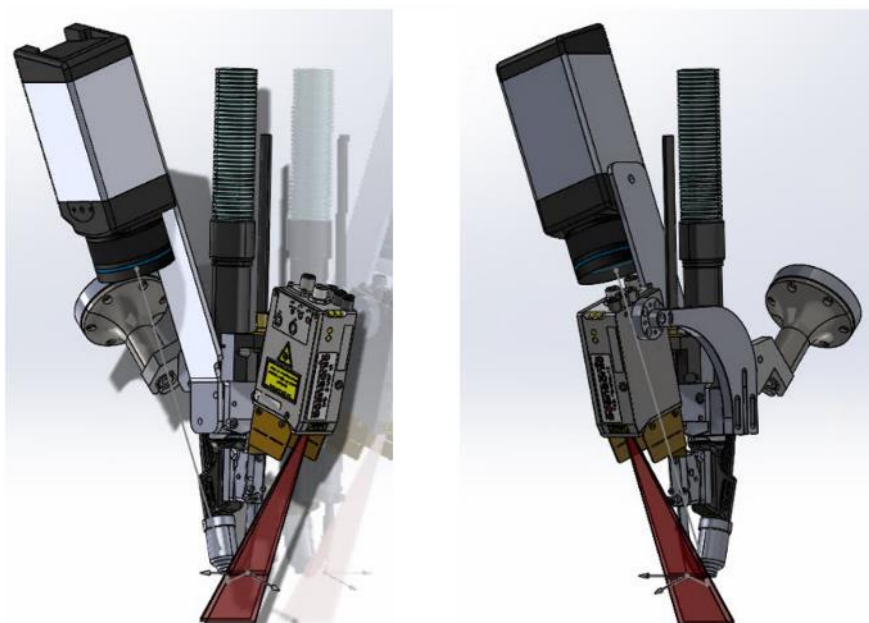


Figura 108. Diseño de sistema de detección de defectología por termografía para proceso GTAW

En las Figura 107 y Figura 108 se pueden observar los modelos digitales diseñados por el personal de Fundación Idonial para la integración de la cámara termográfica en las instalaciones de las plantas pilotos de Avilés, donde se han realizado las pruebas de WAAM de este proyecto. En concreto para la realización de estas pruebas se utilizó la cámara de Idonial marca FLIR modelo SC655. Esta cámara permite un rango de trabajo entre los  $-20^{\circ}\text{C}$  y los  $2000^{\circ}\text{C}$ , tiene un detector de tipo microbolómetro de tipo FPA de  $640 \times 48$  píxeles y presenta una muy adecuada sensibilidad térmica inferior a  $0.05^{\circ}\text{C}$  a los  $30^{\circ}\text{C}$  de temperatura. Su sistema de conexión es del tipo Ethernet-USB con velocidad de 1Gbit para la rápida comunicación de sistemas y control. La cámara permite almacenamiento de imágenes infrarroja en formato JPEG radiométrico, conteniendo la información IR en todo el rango dinámico en 16 bits. El almacenamiento en tiempo real se realiza directamente a PC en imágenes y secuencias de imágenes infrarrojas. Estas capacidades permiten realizar mediciones en tiempo real, con mucha nitidez, y a una velocidad de refresco de imagen que facilita gestionar hasta un máximo de 50 imágenes por segundo. Con esta capacidad de análisis de la cámara, y teniendo en cuenta que la velocidad de desplazamiento del cabezal es de 50 cm/min como máximo para el WAAM, la FLIR SC655 puede obtener 6 imágenes por cada mm de

desplazamiento del cabezal que a su vez incluye la cámara. En función de las pruebas realizadas se puede determinar que la capacidad de análisis de la cámara FLIR es adecuada para la medición de todos los defectos de soldadura y de sus límites aceptados por la UNE EN 5817, cuya dimensión mínima no aceptable es de 0.2- 0.3 mm, según se comentará en secciones posteriores.

Teniendo en cuenta que los procesos de soldadura para WAAM en modo GMAW-CMT y en modo GTAW estarán en cualquier caso a una velocidad inferior a los 50cm/min, de acuerdo a las indicaciones de otras partes de esta memoria, la cámara FLiR SC655 permite obtener la cantidad de información necesaria para realizar un proceso de inspección en línea mediante termografía.

En el caso de brazos robotizados de soldadura, como el de las plantas piloto de Idonial, se deberá siempre garantizar que el enfoque desde la posición de cámara apunta a la trayectoria de la soldadura desde la parte del enfriamiento del cordón.

### CALIBRADO DE LA CÁMARA INFRARROJA

Es necesario tener en cuenta que las cámaras termográficas obtienen una imagen térmica, la cual a diferencia de la imagen real, es una imagen de intensidad de radiación térmica, no de la distribución de temperaturas captadas por el equipo. Las diferencias en intensidades de radiación no se traducen en diferencias de temperatura. Esto es debido a que la temperatura leída por la cámara es la temperatura aparente, no compensada o corregida en la cámara termográfica, mostrándonos toda la radiación incidente en nuestra cámara, independientemente de la fuente de la que procede la radiación infrarroja. Para ello es necesario realizar una compensación de imagen para obtener la temperatura real. Debido a esto, todas las cámaras infrarrojas van a permitir modificar los parámetros necesarios para su calibrado. Estos parámetros principalmente son temperatura aparente reflejada, emisividad, distancia, temperatura exterior y humedad relativa.

La emisividad tiene un efecto importante sobre la imagen térmica:

- Si se mide un cuerpo de alta emisividad, la temperatura aparente del cuerpo es cercana a su temperatura real. La incertidumbre en la medida de la temperatura en este caso es reducida. Menor de 2°C con cualquier equipo para uso industrial.
- Si se mide un cuerpo de baja emisividad, la temperatura aparente del cuerpo es cercana a las temperaturas aparentes de los cuerpos cercanos. En este caso la incertidumbre de la medición es elevada, >10°C.

La emisividad de un cuerpo depende de varios factores, siendo los más importantes: el material del cuerpo, su geometría, su acabado superficial, el ángulo de la imagen, la temperatura y la longitud de onda. La influencia de estos factores se puede ver en la Figura 109.

Material (temperatura del material)	Emisividad
Acero laminado en frío (93 °C)	0,75–0,85
Acero oxidado (200 °C)	0,79
Acero superficie tratada térmicamente (200 °C)	0,52
Algodón (20 °C)	0,77
Aluminio laminado sin tratamiento (170 °C)	0,04
Aluminio muy pulido (100 °C)	0,09
Aluminio, muy oxidado (93 °C)	0,2
Aluminio, no oxidado (100 °C)	0,03
Aluminio, no oxidado (25 °C)	0,02
Arcilla (70 °C)	0,91
Caucho, blando, gris (23 °C)	0,89
Cinc oxidado	0,1
Cobre ligeramente deslustrado (20 °C)	0,04
Cobre oxidado (130 °C)	0,76
Cobre, laminado (40 °C)	0,64
Cobre, pulido (40 °C)	0,03
Corcho (20 °C)	0,7
Cristal (90 °C)	0,94
Cromo (40 °C)	0,08
Cromo pulido (150 °C)	0,06
Cuerpo refrigerante anodizado negro (50 °C)	0,98

Material (temperatura del material)	Emisividad
Goma dura (23 °C)	0,94
Granito (20 °C)	0,45
Hielo liso (0 °C)	0,97
Hierro con costra de fundición (100 °C)	0,8
Hierro con costra de laminación (20 °C)	0,77
Hierro de fundición oxidado (200 °C)	0,64
Hierro, esmerilado (20 °C)	0,24
Hormigón (25 °C)	0,93
Ladrillo, mortero, revoque (20 °C)	0,93
Latón oxidado (200 °C)	0,61
Madera (70 °C)	0,94
Mampostería (40 °C)	0,93
Mármol blanco (40 °C)	0,95
Papel (20 °C)	0,97
Piedra arenisca o gres (40 °C)	0,67
Pintura azul sobre lámina de aluminio (40 °C)	0,78
Pintura blanca (90 °C)	0,95
Pintura de transformadores (70 °C)	0,94
Pintura negra mate (80 °C)	0,97
Pintura, amarilla, 2 capas sobre lámina de aluminio (40 °C)	0,79
Pinturas al óleo (cualquier color) (90 °C)	0,92–0,96
Plásticos: PE, PP, PVC (20 °C)	0,94
Plomo (40 °C)	0,43
Plomo oxidado (40 °C)	0,43
Plomo, gris oxidado (40 °C)	0,28
Porcelana (20 °C)	0,92
Yeso (20 °C)	0,9

Figura 109. Tabla de emisividad de algunos materiales en distintas condiciones.

Por otro lado, es necesario indicar que el color del objeto no es factor que influya en la emisividad, ya que pertenece al espectro visual y no al del infrarrojo. Sí que es cierto que los colores absorben luz visible, pero la radiación solar es más alta en la franja visual que el infrarrojo, por lo que algunos colores absorben más radiación que otros y por lo tanto se calientan más, pero esto no tiene relación directa con la emisividad.

Existen técnicas para medir la emisividad, pero la más utilizada es pintar o cubrir una superficie con algún material con emisividad conocida, alta y constante (por ejemplo cinta aislante negra tiene emisividad del 0.95). Al ir calentando la superficie, la cinta se calentará a la temperatura de la superficie, pudiéndose realizar mediciones de temperatura sobre esta. De esta manera se debe realizar la calibración de la cámara sobre un patrón de emisividad conocida.

Finalmente, es importante fijar un rango de temperaturas (máxima y mínima) para evitar que la cámara reciba más radiación de la necesaria y evitar la saturación de datos en el detector.

## ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN INFRARROJA

Una vez realizada la imagen termográfica, se pueden efectuar dos tipos de análisis de la misma imagen infrarroja: cualitativo y cuantitativo. En el análisis cualitativo la imagen térmica es analizada para poner de manifiesto anomalías de distinta magnitud, localizarlas y evaluar el nivel de gravedad. Este análisis está basado en la temperatura aparente, sin compensación. Para conseguir una mayor efectividad en el análisis de las imágenes, es necesario disponer de una gran base de datos de la que el software pueda contrastar información con mayor efectividad sobre el tipo, tamaño, localización de la discontinuidad y considerarla o no como un defecto o discontinuidad, según el criterio de aceptación que se esté considerando en cada momento. Este fue el método usado en el análisis de los defectos en la parte experimental.

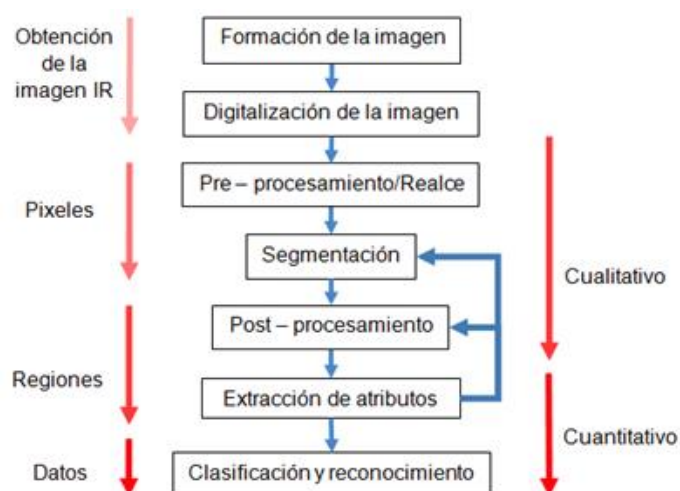


Figura 110. Secuencia de procesamiento y análisis de imágenes digitales infrarrojas.

Para la realización de las pruebas experimentales de la cámara, se colocó la FLIR SC655 en la celda robotizada de los procesos GTAW y PAW. Se utilizó parte del acoplamiento principal del sistema termográfico. En concreto aquellas partes necesarias para la instalación de la cámara termográfica y otros subsistemas (como pudieran ser el detector de juntas o el perfilómetro posterior). La cámara termográfica se sitúa por detrás del cabezal de soldeo, en la dirección de avance, para que vaya obteniendo la emisión infrarroja del cordón de soldadura, durante el enfriamiento posterior a la fusión. 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.

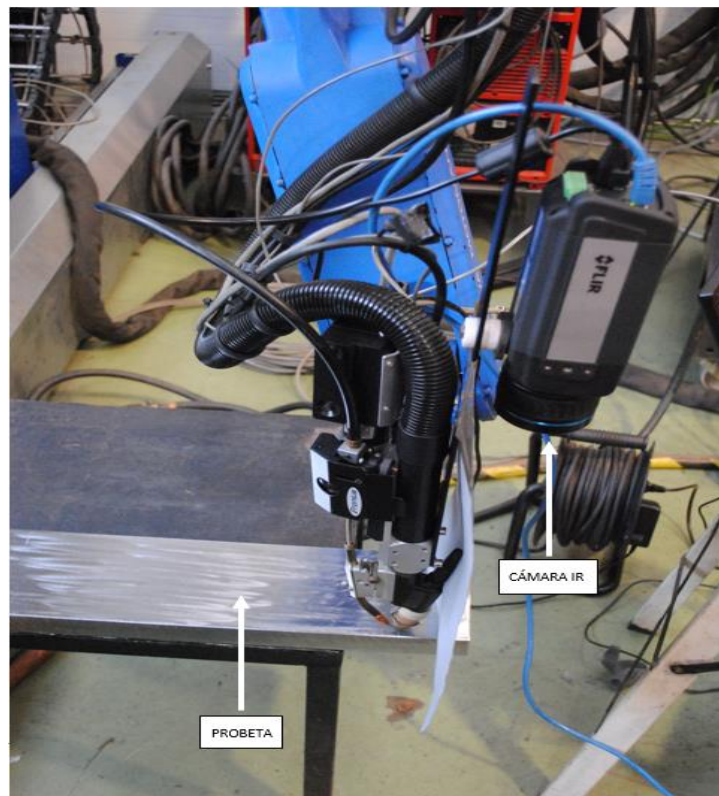


Figura 111. Disposición del sistema de medida infrarroja, cámara FLIR SC655 en las instalaciones de Fundación Idonial.

#### 4.1.2 Definición de defectos típicos para WAAM.

Antes de la realización de las pruebas para el estudio de la defectología en línea mediante la técnica de la termografía, fue necesario determinar qué tipo de defectos se pueden presentar en el proceso WAAM. Además, fue necesario inicialmente determinar la señal emitida y captada por la cámara FLIR, que produce un cordón de soldadura sano usado en WAAM, para así poder contrastarlo con los defectos que se puedan producir durante el proceso de deposición por arco. Por ello, se consideró necesario generar una base de datos lo más amplia posible, y realizar un número relevante de ensayos experimentales de simulación de defectos de WAAM en la planta piloto de Fundación Idonial. Los datos obtenidos de los distintos defectos, finalmente fueron integrados en la base de datos.

Los defectos que se pretendieron detectar mediante termografía, al ser estos identificados por el staff técnico de Idonial, como los más habituales en las fabricaciones de WAAM fueron los siguientes:

- Falta de fusión entre capas y entre cordones.
- Cambio de trayectoria.
- Porosidad superficial.
- Inclusiones de tungsteno.

## FALTA DE FUSIÓN

La falta de fusión es una discontinuidad que puede producirse, entre cordones depositados o entre capas de una pared recrecida por WAAM, en la que la fusión no ocurre al 100% entre el metal de soldadura y las caras de fusión o los cordones adyacentes, es decir, se produce una pegadura y no una verdadera unión, sino una descohesión del material. Este tipo de imperfecciones del material se denominan como discontinuidad o discontinuidad abierta, open discontinuity, en los códigos de fabricación de partes estructurales de cierta responsabilidad.

Este defecto suele tener una geometría alargada (más larga que ancha) y en términos generales suele considerarse un defecto muy peligroso, al tratarse de un concentrador de tensiones similar a una grito, y por lo tanto no suele ser aceptado por la mayor parte de los códigos de fabricación de estructuras o piezas con soldadura de alta y media responsabilidad.

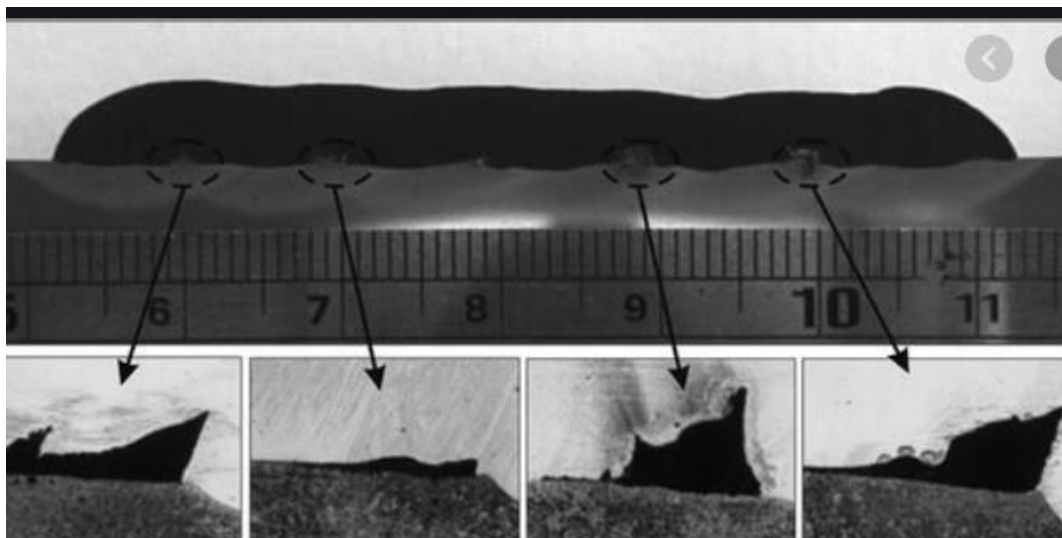


Figura 112. Faltas de fusión en distintos tipos de recargues para WAAM.

La falta de fusión, en la imagen termográfica, se manifiesta como una zona más fría (franja oscura) en el centro del cordón, debido a que en esa zona no existe material sino un espacio.

## CAMBIO EN LA TRAYECTORIA

En algunos casos, los cordones de soldadura no siguen la trayectoria predeterminada o su geometría no es la adecuada, debido fundamentalmente a errores en la programación, parámetros eléctricos, o en la toma de orígenes de referencia entre trayectorias que integran la pieza de WAAM. Para estos casos, el sistema termográfico puede resultar muy útil en la detección de los cambios de trayectoria y geometría del cordón, los cuales también pueden ser debidos a contracciones severas durante el proceso masivo de deposición de capas que supone el WAAM. Estos errores de posicionamiento entre pieza y cabezal de soldadura robotizado, se traducen en una deposición inadecuada del cordón de soldadura y posiblemente en otro tipo de defectos asociados, como las propias faltas de fusión anteriormente mencionadas.

## POROSIDADES

Según el código de fabricación AWS A3.0 Standard Welding Terms and Definitions, se define porosidad como un tipo de discontinuidad que forma una cavidad provocada por la acumulación de gases, que quedan ocluidos durante el proceso de soldeo del WAAM. La porosidad, por tanto puede considerarse como un vacío o una bolsa de gas dentro del metal de soldadura solidificado, aunque puede llegar a la superficie si el material aún no ha solidificado y la presión interior del gas ocluido es lo suficientemente elevada como para desplazar el caldo de metal fundido. Debido a su forma,

característicamente esférica, (o suma de esferas alineadas: agujeros de gusano: worm holes) la porosidad individual es considerada como uno de los defectos menos peligrosos a nivel estructural.

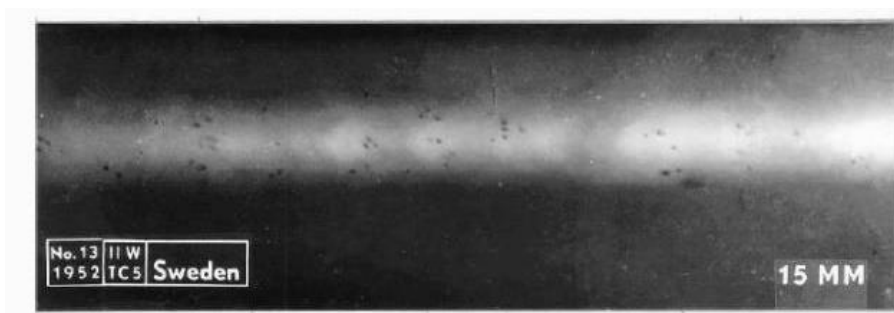


Figura 113. Radiografía con un alto contenido en poros.

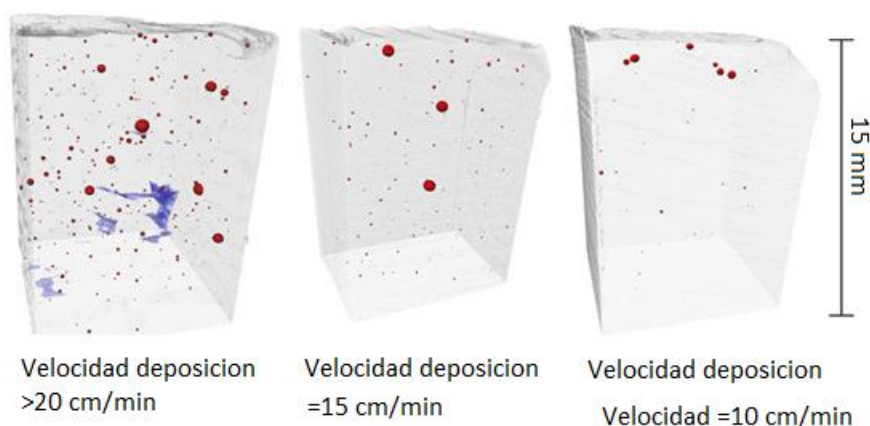


Figura 114. Simulación de las porosidades en piezas de Aluminio a distintas velocidades de deposición por WAAM.

#### 4.1.3 Pruebas para reproducir patrones de defectos WAAM.

En esta tarea se analizaron los distintos defectos que se pueden producir en los cordones de soldadura por el proceso GTAW para WAAM, de acuerdo a las indicaciones recogidas en el apartado 4.1.2, con sus correspondientes imágenes termográficas. Para ello, se realizaron varios cordones de soldadura de prueba, cordones sanos, siguiendo los parámetros eléctricos indicados en el apartado 1.1 *Fabricación de demostradores aluminio (AlSi5)*. Sobre estos cordones tipo, se aplicaron distintas perturbaciones para generar los distintos defectos mencionados anteriormente. Sobre estas pruebas se realizaron mediciones con la cámara Flir, en línea, y a continuación de baño de soldadura, y se obtuvieron imágenes termográficas que permitieron determinar patrones termográficos de defectos típicos.

Para la realización de las pruebas, se efectuaron cordones de soldadura utilizando un consumible de aluminio del tipo SFA/AWS A 5.10: ER 4043, EN ISO 18273: S AL 4043 (AlSi5) sobre una metal base tipo Aluminio Silicio 4043 grupo 4 en las serie de los aluminios. Para realizar una correcta medición de los campos de temperatura fue necesario el ajuste de la emisividad.

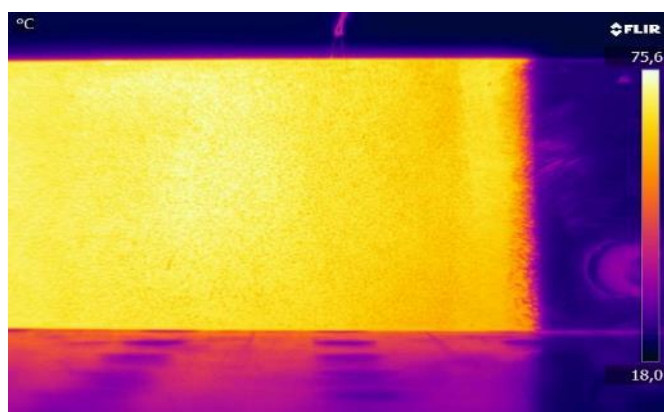


Figura 115. Imagen termográfica de calibración.

La Figura 115 muestra una imagen de la señal termográfica utilizada para realizar la calibración de la cámara termográfica Flir, que a su vez permite demostrar las diferencias en la señal termográfica de materiales con distintas emisividades. Chapa de Aluminio (brillo intenso) contra mesa de acero al carbono con acabado mate (sin brillo).

Adicionalmente, en la calibración fue 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.

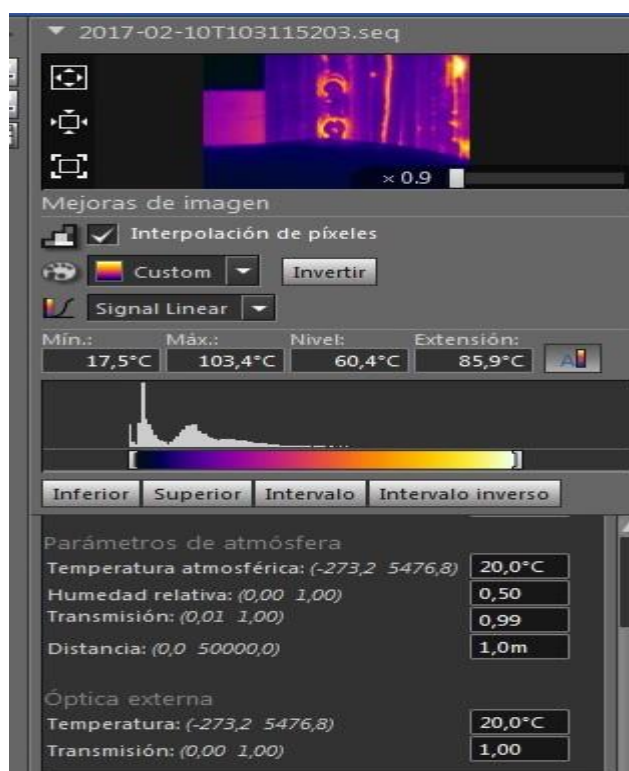


Figura 116. Parámetros de calibración introducidos para la realización del análisis termográfico.

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 según la inspección visual que sirvió como referencia en el posterior análisis de defectología.

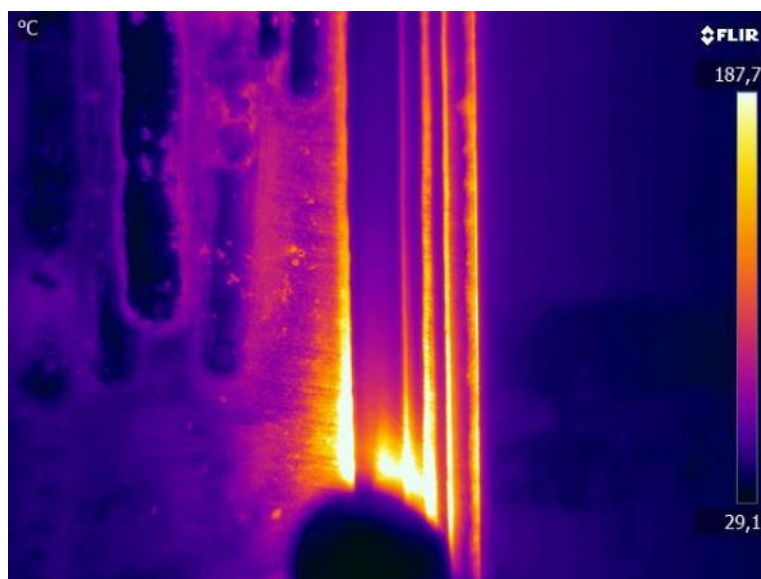


Figura 117. Imagen termográfica de un cordón de soldadura sin defectos a nivel macroscópico.

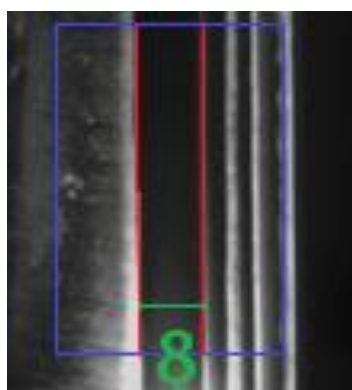


Figura 118. Filtrado de imagen para medición de ancho de cordón con Software IDONIAL.

En la Figura 117 se puede observar la señal termográfica de un cordón de soldadura para WAAM 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.

Una vez establecidas las zonas correctas de lectura de parámetros de temperatura, es posible realizar análisis de los defectos en el cordón. El software de medición de Idonial, para el tratamiento de datos pasa la imagen a escala de grises como primera tarea, selecciona la zona central de la señal, que fue programada como un rectángulo de 30x50mm. Esta zona es la determinada como zona de interés y su localización ha de ser seleccionada manualmente por un operador. En esta zona el software de determinación de defectos permite realizar ciertas mediciones en función de la diferencia de escala de grises. En la figura Figura 118 el sistema mide el ancho de cordón, para ello el sistema traza dos líneas rectas paralelas en rojo, estas líneas siguen un patrón rectilíneo donde con brillo variable en un 10% respecto a un fondo más oscuro. Para Identificarlas como los laterales del cordón, estas dos líneas han de estar separadas el ancho del cordón nominal (valor que se mete a mano en el sistema)  $\pm 10\%$ . Otras líneas rectas que no cumplan estas condiciones no serán señaladas. Finalmente entre ambas líneas el sistema marca la distancia perpendicular entre ellas para señalar la medida del ancho del cordón.

## PRUEBAS GTAW CON DEFECTOLOGÍA INDUCIDA

- *Cambios en la trayectoria de soldeo*

La Figura 119 muestra la imagen termográfica 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), lo que delimita las dimensiones del cordón de manera más clara en el borde del cordón de soldadura. En el software de medición de defectos, cuando los caminos de cordón tomados en dos zonas de interés consecutivas no son coincidentes en los extremos, el sistema emite una señal de cambio de trayectoria. Este sistema solo ha sido desarrollado y probado para el caso de soldaduras de trayectorias rectas. No se ha implementado el caso de otro tipo de trayectorias más complejas, que por otro lado serian de interés para una supuesta aplicación industrial de la técnica.

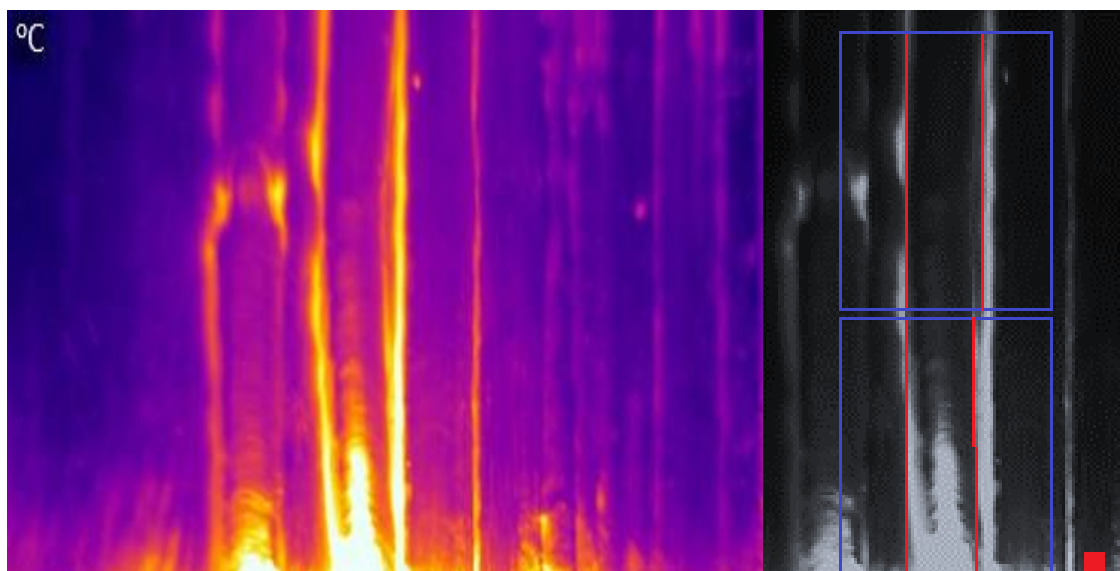


Figura 119. Imagen termográfica de cordón con cambio de trayectoria (1).

- *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 120 muestra zonas de exceso de material de aporte y un inadecuado empalme entre los cordones, en zonas puntuales de una pasada, generando un cordón de soldadura no admisible, debido a su ancho irregular. Adicionalmente estas zonas, donde se deposita más material, tienen una mayor temperatura en sus límites como puede apreciarse en la figura. En el software de medición de defectos, cuando los caminos de cordón tomados a los extremos del mismo varían de dirección bruscamente dentro de la propia zona de interés, o incluso en algún caso estas variaciones muestran líneas de tendencia más brillante perpendiculares a la dirección de soldeo, el sistema marca estas líneas adicionales como naranjas. Las líneas naranjas indican cambios bruscos en el ancho o geometría de cordón. Si estas líneas distan más de un 10% de las líneas rojas se supone que el cambio de geometría de cordón supone un defecto inadmisibles.

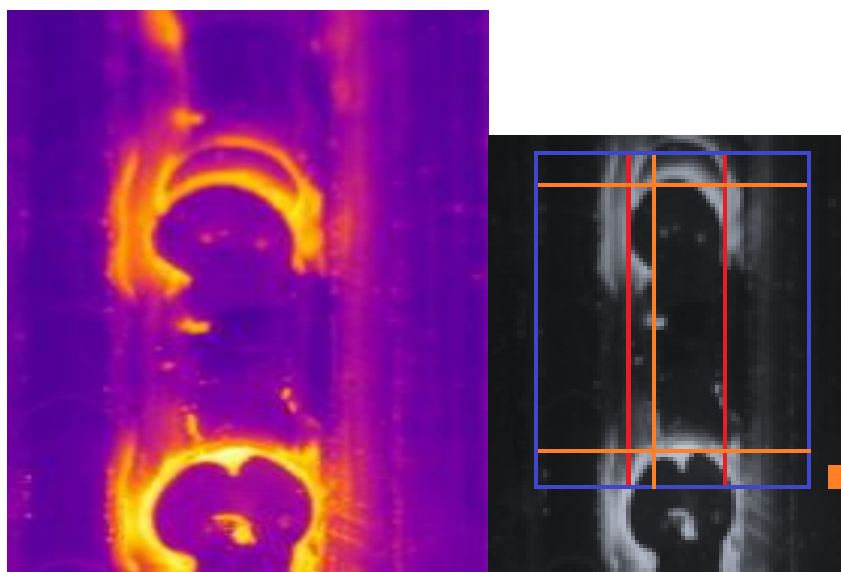


Figura 120. Cambios en la morfología del cordón.

- *Proyecciones (o salpicaduras) de soldadura*

Las proyecciones o salpicaduras son porciones pequeñas de material del baño de soldadura que salen desprendidas del cordón quedando alrededor de este, por efecto de las fuerzas magnéticas alrededor del baño y de la estabilidad del arco. Este defecto suelen ser más habitual en cordones depositados en modo de transferencia de corto circuito en el caso del proceso GMAW, pero en el proceso GTAW, aunque menos habituales también se producen.

Para generar la simulación de estos defectos en las plantas piloto de Idonial, celda 2 con el proceso GTAW, se introdujo en la trayectoria de soldeo una volumen reducido de aceite y óxidos, produciendo una falta de limpieza del metal base y de esta manera se consiguió generar las proyecciones deseadas (para luego medirlas termográficamente).

La Figura 121 muestra la señal térmica de una proyección de soldadura (zona circular de mayor temperatura). Al tratarse de una esfera de metal que se desprende del baño de fusión a alta temperatura, y unirse ésta al material base, la esfera no tiene prácticamente caminos de evacuación de calor. En consecuencia se convierte fácilmente en un punto caliente del sistema y la cámara termografica es capaz de detectarla fácilmente. Sobre la imagen filtrada en gris del software desarrollado para identificación de defectos, en la zona de interés central del cordón, el sistema hace pasar por la imagen una rejilla virtual con círculos rojos para indicar tamaño de defecto redondeado no aceptable, y otra fila de círculos más reducidos de tamaño menor, y por tanto aceptables. El sistema utiliza un sistema de comparación pasa-no pasa entre los dos círculos para intentar definir si el defecto redondeado localizado por diferencias de tonos gris es aceptable o no. En el desarrollo realizado se pudo comprobar que el sistema fue capaz de identificar defectos no aceptables de forma correcta y a la velocidad de soldadura, si estos eran mayores de 1 mm de diámetro.

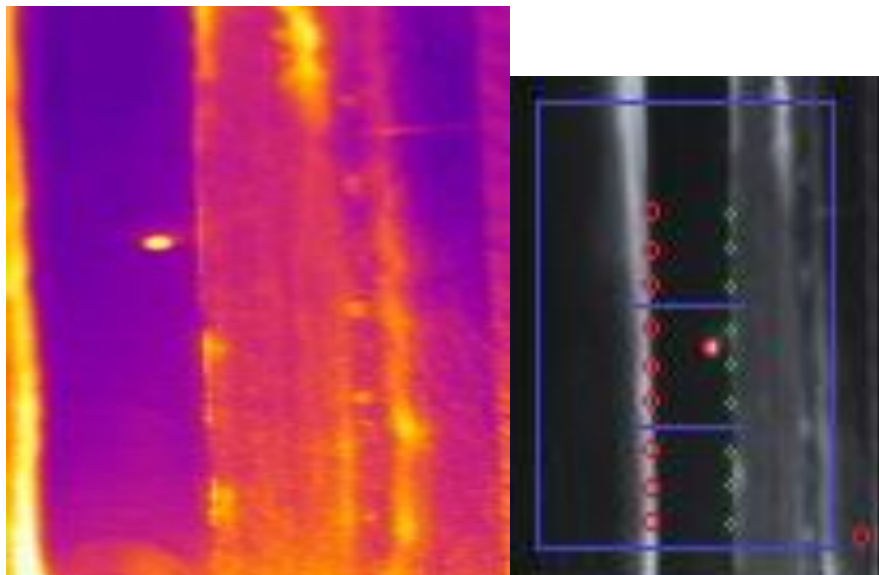


Figura 121. Proyección de soldadura.

- Porosidad

El defecto de porosidad es producido por falta de limpieza, defecto del material aportado, fallo en la regulación de la soldadura, pero principalmente por falta de protección de gas de soldadura, creando bolsas de gas en el cordón de soldadura que normalmente suelen quedar contenidas por el baño y son apreciadas en la superficie del cordón.

Tal como se ve en la Figura 122, las pruebas realizadas para introducir porosidad, usando las plantas piloto de Idonial, muestran una señal térmica con una temperatura mucho más elevada que el cordón de soldadura, debido a la formación de poros superficiales que tienen gran emisividad térmica.

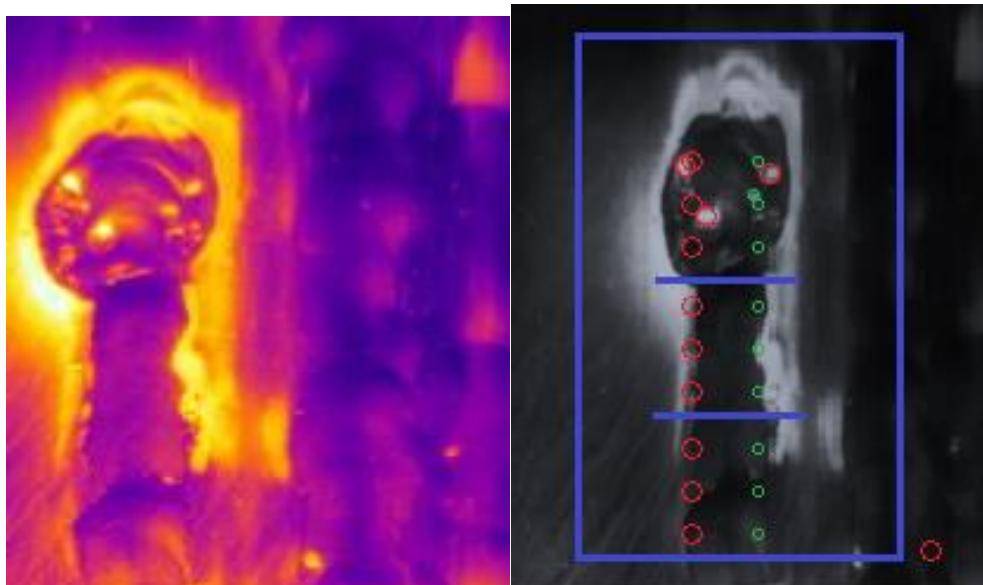


Figura 122. Cordón de soldadura afectado por porosidad (1).

- Entallas bajo el cordón de soldadura

Dentro de las pruebas experimentales de esta actividad, 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 internos y no vistos desde la superficie.



Figura 123. Entalla inducida sobre el material para su análisis termográfico.

La Figura 123 muestra la entalla que se realizó 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 3 mm, restringiéndose por tanto esta técnica a defectos superficiales o subsuperficiales.

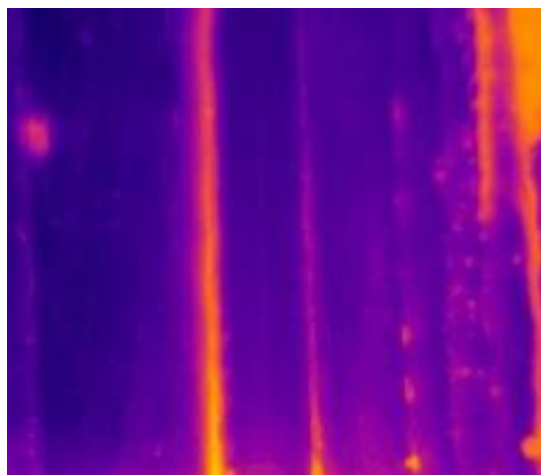


Figura 124. Cordón con entalla inducida y aparentemente sano (dcha.).

#### 4.1.5 Base de datos y software de defectos.

Con las medidas experimentales realizadas se generó una base de datos que alimentó al software Idonial de análisis e identificación de defectos en línea para poder detectar los defectos superficiales más relevantes en las fabricaciones WAAM.

Se tomó como referencia 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', 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'.

Para los siguientes defectos se tomaron los siguientes límites de la mencionada norma:

- Cambios de trayectoria. Límite de aceptación <10% de ancho del cordón.
- Geometría del cordón soldado (principalmente variaciones en anchura). Límite de aceptación <10% de ancho del cordón.
- Proyecciones y salpicaduras: Límite de aceptación <1 mm. Se tomó este nivel de defecto admisible en base a la experiencia de los técnicos IWE de Idonial, ya que la propia norma de defectología no indica un tamaño máximo para ninguno de los 3 niveles de referencia.
- Porosidades u otros defectos esféricos en superficie <1 mm. Se tomó este criterio para la base de datos a pesar de que el criterio general de la UNE-EN ISO 5817, donde el máximo considerado para el nivel más restrictivo es de 3 mm.

A pesar de que las pruebas experimentales solamente pudieron ser satisfactorias en los defectos superficiales más habituales, debido a las propias limitaciones de la técnica termográfica, la base de datos generada por los técnicos IWE de la Fundación introdujo toda la información básica de referencia de los defectos recogidos en la norma UNE-EN ISO 5817. En las siguientes figuras se incluyen las capturas de pantallas más relevantes de la base de datos generada.

En la Figura 125 se designa el tipo de deposición WAAM con la que se esté trabajando, que se asimila por simplicidad a uniones en ángulo o unión a tope. Principalmente se selecciona por defecto la unión a tope por ser más parecida a una deposición en posición PA característica del WAAM.

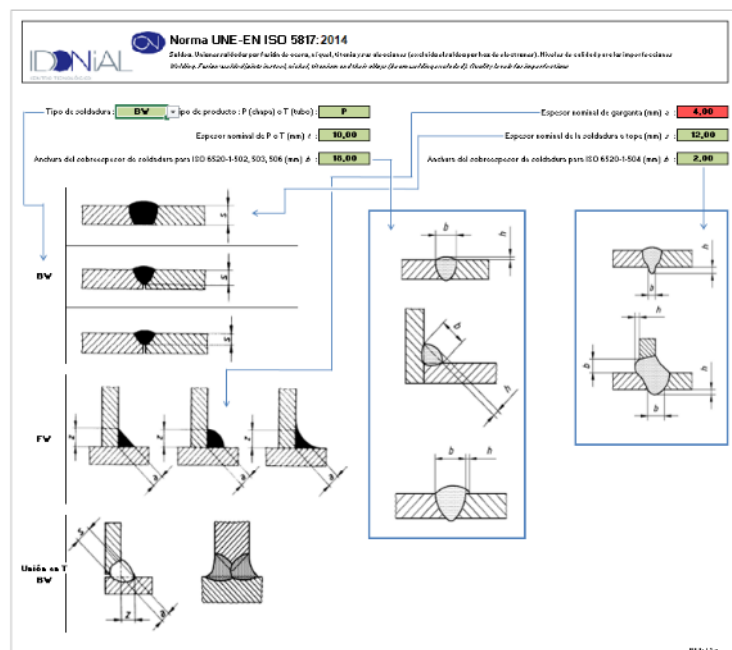


Figura 125 .Definición de espesores y tipo de cupón de soldadura.

En la Figura 126, se incluye el cálculo que hace la base de datos de los valores límite para los 3 niveles de calidad por defecto que establece la norma y ya se identifica el tamaño máximo admisible para cada uno de los defectos recogidos por la norma. Por último se seleccionan por defecto el nivel de aplicación para la pieza WAAM en función de las indicaciones de la norma UNE EN ISO 15614-1. Estos valores ya están ajustados en medidas de mm en función de las elecciones anteriores que

hay que realizar antes de la inspección. El software de inspección directamente toma estos valores de la base de datos para indicar si el defectos detectado es admisible o no.

**Norma UNE-EN ISO 5817: 2014**

Tipos de soldadura: **BW** - Producto: P (chapas) o T (tubo) - **P** Espesor nominal de P o T (mm)  $\epsilon$ : **6,70** Espesor nominal de garganta (mm)  $\alpha$ : **4,00**

Espeor nominal de la soldadura a tope (mm)  $\delta$ : **2,90**

Anchura del sobrepeso de soldadura para ISO 6520-1:502, 503, 506 (mm)  $\delta$ : **6,00** Anchura del sobrepeso de soldadura para ISO 6520-1:504 (mm)  $\delta$ : **2,90**

IMPERFECCIONES SUPERFICIALES				Tipo	Observaciones	Límites máximos de las imperfecciones				
ISO 6520	Designación	Esasgos	Visual			D	C	B		
100	Grietas	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	Inadmisible	Inadmisible	Inadmisible		
104	Grietas de cráter	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	Inadmisible	Inadmisible	Inadmisible		
201T	Picaduras	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\sigma'$ (mm)	1,20	0,80	Inadmisible	
202S	Rechupes de cráter abierto	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	1,34	0,67	Inadmisible	
401	Falta de fusión	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	-	Inadmisible	Inadmisible	Inadmisible	
401A	Microfalta de fusión	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	-	Admisible	Admisible	Inadmisible	
4021	Falta de penetración en la raíz	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	1,34	Inadmisible	Inadmisible	
5011	Mordedura continua	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	transición gradual	$\delta$ (mm)	1,00	0,50	0,34
5012	Mordedura discontinua	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	transición gradual	$\delta$ (mm)	1,00	0,50	0,34
5013	Contracción en la raíz	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	transición gradual	$\delta$ (mm)	1,34	0,67	0,34
502	Exceso de sobrepeso	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	transición gradual	$\delta$ (mm)	2,50	1,30	1,60
503	Exceso de convexidad	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	2,50	1,30	1,60	
504	Exceso de penetración	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	3,00	2,20	1,40	
5051	Ángulo de acuerdo incorrecto	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\alpha$ (°)	$\geq 90$	$\geq 100$	$\geq 110$	
506	Sobresaliente	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	1,20	Inadmisible	Inadmisible	
509	Desfondamiento	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	transición gradual	$\delta$ (mm)	1,65	0,67	0,34
510	Perforación	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	transición gradual	-	Inadmisible	Inadmisible	
511	Falta de espesor	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	1,65	0,67	0,34	
512	Exceso de simetría	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	2,80	2,60	2,10	
515	Rechupes de raíz	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	transición gradual	$\delta$ (mm)	1,34	0,67	0,34
516	Porosidad en la raíz	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	-	Admisible	Inadmisible	Inadmisible	
517	Empalmes defectuosos	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	-	Admisible	Inadmisible	Inadmisible	
5213	Espesor de garganta insuficiente	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	0,70	0,70	Inadmisible	
5214	Espesor de garganta excesivo	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	Admisible	1,60	1,60	
601	Cebado del arco	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	-	Admisible	Inadmisible	Inadmisible	
602	Proyecciones	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	-	-	-	depende de la aplicación	
IMPERFECCIONES INTERNAS				Tipo	Observaciones	Límites máximos de las imperfecciones				
ISO 6520	Designación	Esasgos	Visual			D	C	B		
100	Grietas	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	Inadmisible	Inadmisible	Inadmisible		
101	Microgrietas	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	Admisible	depende del metal base	Inadmisible		
201	Sopladuras	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\sigma'$ (mm)	1,60	0,80		
2011	Poro	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\sigma'$ (mm)	1,60	1,20	0,80	
2012	Porosidad uniformemente distribuida	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\sigma'$ (%)	2,50	1,50	1,00	
2014	Porosidad alineada	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\sigma'$ (%)	5,00	4,00	2,00	
2015	Sopladura alargada	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	1,60	1,20	0,80	
2016	Sopladura vermicular	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	4,00	4,00	4,00	
202	Rechupes	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	1,60	Inadmisible	Inadmisible	
2024	Rechupes de cráter	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ o $\delta'$ (mm)	1,34	Inadmisible	Inadmisible	
300	Inclusiones sólidas	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	1,60	1,20	0,80	
301	Inclusión de escoria	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	4,00	4,00	4,00	
302	Inclusión de fundente	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	1,60	1,20	0,80	
303	Inclusión de óxido	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	4,00	4,00	4,00	
3041	Inclusión metálica de volttramo	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	1,60	1,20	0,80	
3042	Inclusión metálica de cobre	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	-	Inadmisible	Inadmisible	Inadmisible	
3043	Inclusión metálica de otro metal	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	1,60	1,20	0,80	
401	Falta de fusión	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	1,60	Inadmisible	Inadmisible	
402	Falta de penetración	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	0,80	Inadmisible	Inadmisible	
402	Falta de penetración	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	0,80	0,40	Inadmisible	
									- para penetración total	
									- para penetración parcial	
IMPERFECCIONES EN LA GEOMETRÍA				Tipo	Observaciones	Límites máximos de las imperfecciones				
ISO 6520	Designación	Esasgos	Visual			D	C	B		
601	Falta de alineación	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	5,00	4,00	3,00	
617	Abertura en la raíz incorrecta	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	2,20	1,30	0,30	
IMPERFECCIONES MÚLTIPLES				Tipo	Observaciones	Límites máximos de las imperfecciones				
ISO 6520	Designación	Esasgos	Visual			D	C	B		
-	En cualquier sección transversal	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ (mm)	1,00	0,80	0,60	
-	En cualquier sección longitudinal	Fractura	Macrográf. Micrográf.	BW, FW	-	$\delta$ o $\delta'$ (%)	16,00	8,00	4,00	

Figura 126 .Valores límite de la norma UNE EN 5817-1 para una pieza determinada.

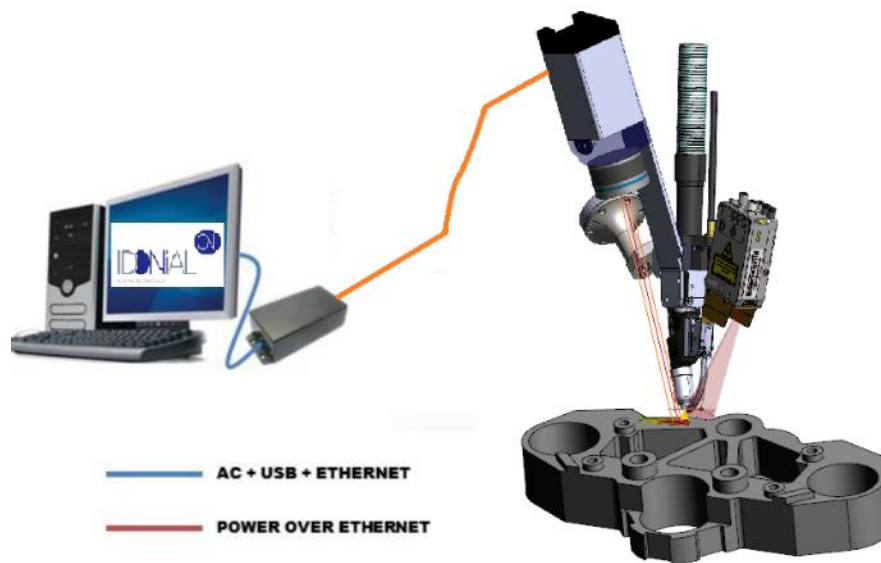


Figura 127 . Esquema de conexión Host, instalación básica de cámara a PC.

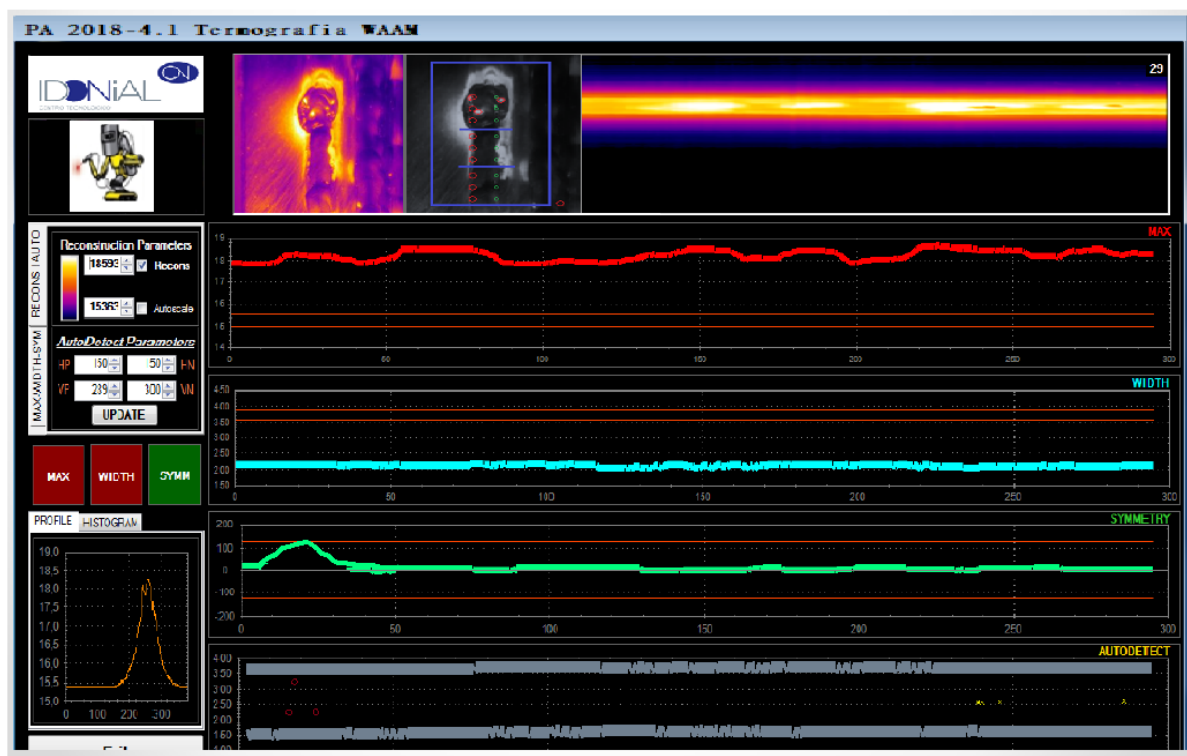


Figura 128 . Software de monitorización y medición de defectos.

Una vez ejecutado el software Visor/analizador se comprueba la recepción de imágenes desde la cámara. En esta zona se muestra la imagen termográfica a 30 fps. Se puede cambiar el color de la imagen de paleta termográfica IRON o GRISES, en la cual se hicieron las pruebas de defectos. El software permite la captura de vídeo y registros de los cursores en formato binario y MAT. El software analiza en línea la imagen termográfica, estudia ancho de cordón, distorsiones en el mismo y detección de defectos en base a la aplicación de rejillas de cordón y porosidad o salpicaduras anteriormente comentadas. En la parte inferior de la pantalla de control el sistema marca los defectos no admisibles en rojo.

#### 4.1.6 Interfaz de comunicación con Robot+Usuario

Para realizar el interfaz de comunicación con el robot se extrajeron los datos del software anterior, cuando este detectaba un defecto no admisible y su categoría. Una vez se extraen, estos datos se almacenan en un fichero del tipo .csv, que posteriormente se importa al programa de control del robot Yaskawa, programa comercial llamado Motoplus. Este segundo programa recibe los datos de los defectos generados no admisibles y los considera estados de alarma, por lo que cuando un defecto fuera de los límites establecidos en la base de datos ocurre, el software el Motoplus da orden a la controladora del robot para que está extinga el arco y el robot Yaskawa se detenga.

##### Esquema de conexiones y datos técnicos

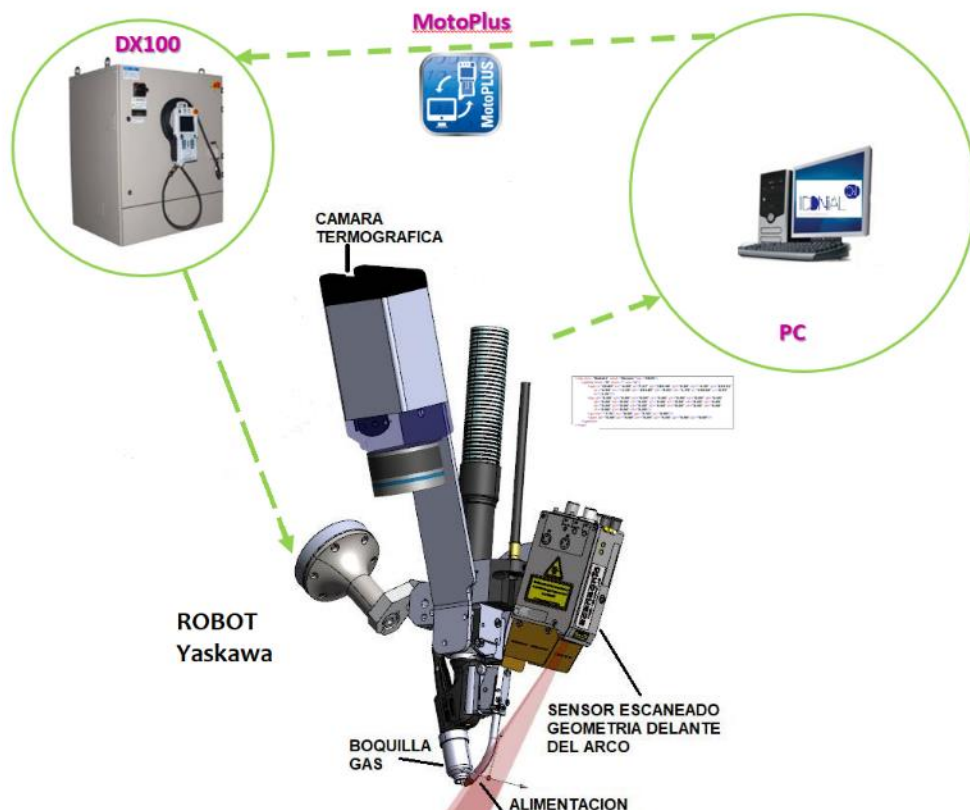


Figura 129. Sistema de control: Cámara Termografica, Pc control, software de defectos, Software MOTOPLUS, comunicación con controladora, orden a robot.

Al final de la tarea 4.1 se ha conseguido por tanto el diseño final del sistema de inspección en línea por termografía y la realización de pruebas especificando los parámetros utilizados y resultados obtenidos. Se dispone así de un cabezal de soldadura con la cámara termográfica integrada, dispone de una base de datos con defectos WAAM, un software de detección de defectos y medición de los mismos y una interface de comunicación entre la cámara termografica y el robot-usuario para la gestión de la defectología.

## Tarea 2. Desarrollo de sistema de control en línea por parámetros eléctricos

En este proyecto se plantea el uso de datos de tensión y corriente para el desarrollo de un sistema de control en línea del proceso de soldeo.

Para ello el primer paso ha sido implementar un sistema de comunicación entre el controlador del sistema de adquisición y un ordenador, donde se ejecutará la aplicación de monitorización de las variables en tiempo real.

Y por último se ha incluido un control de ambos parámetros eléctricos que permite delimitar un rango permitido, estableciendo unos límites superior e inferior para cada señal, evitando que se alcancen valores no deseados. En el momento en el que una de las magnitudes alcanza uno de los límites se activará una alarma visual así como se genera una señal que, actuando mediante la bornera del robot, para el sistema.

Durante la anualidad 2019 se ha llevado a cabo la comunicación entre la tarjeta de adquisición de datos desarrollada a lo largo del proyecto “*ADDITIVE WELDING*” y la interfaz diseñada en este proyecto durante la anualidad 2018.

El sistema de adquisición de datos se ha desarrollado fundamentalmente a través de una *Raspberry Pi 3*, con un módulo de expansión para la conversión AD de los valores muestreados. El sistema de visualización de los datos en tiempo real consiste en un archivo ejecutable diseñado en Visual Studio. Dicho archivo puede ser lanzado desde cualquier ordenador con acceso directo al conjunto de soldadura.

La comunicación entre el ordenador y la tarjeta de adquisición se ha implementado a través de la interfaz UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) de la *Raspberry Pi*, habilitando los pines GPIO14 (TxD) y GPIO15 (RxD) como su puerto serie UART0. Las líneas de entrada/salida de estos pines se convierten mediante un adaptador UART-USB, de manera que pueden ser directamente conectadas al puerto USB del ordenador. Se aprovecha esta misma conexión para alimentar la placa con los 5 V que proporciona la interfaz USB. Se consigue, por tanto, con este nuevo cableado prescindir de la necesidad de alimentar el sistema de adquisición con una fuente externa. Es el propio ordenador el que proporciona la alimentación a través de las líneas de comunicación.

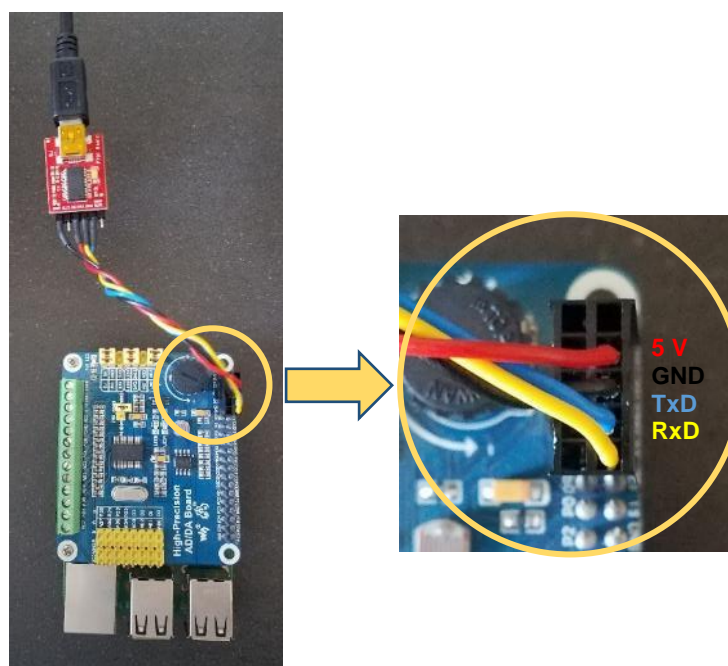


Figura 130. Imagen y detalle de la conexión entre el ordenador y la tarjeta de adquisición

En las pruebas realizadas en la anualidad 2019, para la medición de la corriente se ha colocado un transductor de corriente HAT 1000-S en cable que conecta la pieza con la tierra de la máquina (véase la Figura 131 derecha) y para la medición de la tensión se he recurrido al divisor de tensiones utilizado en la anualidad anterior (véase la Figura 131 izquierda).

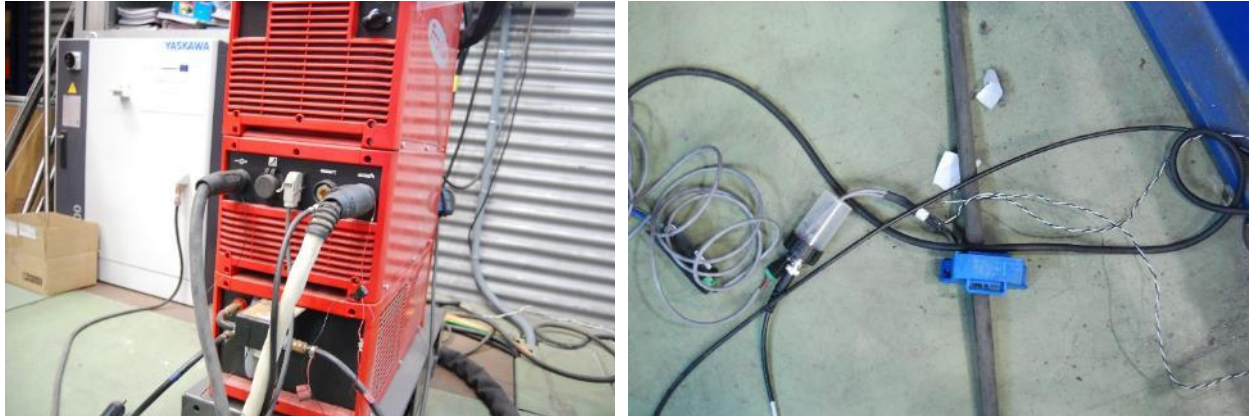
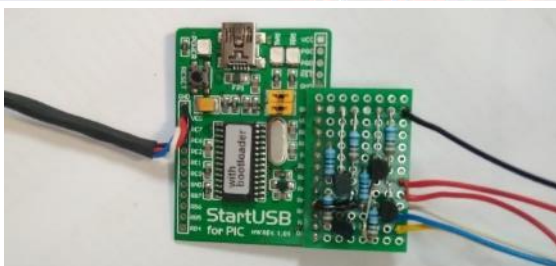
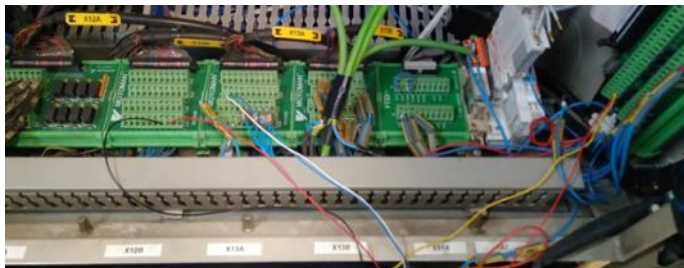


Figura 131. Sistema de adquisición de señales de tensión (izquierda) y de corriente (derecha)

Para la comunicación del sistema de inspección en línea (del PC) con la controladora del robot, se ha recurrido a una tarjeta Small USB 2.0 PIC Development Board con PIC18F2550 (que trasforma la señal digital de parada del PC en una de 0, 24V, normalmente abierta) conectada a la bornera del armario de la controladora del robot.

La tarjeta envía un mensaje con el formato “Entrada x = X”, siendo x el número de entrada tomando valores de 0 a 2. Y siendo X el estado de la entrada, tomando 0 si no hay señal, y 1 si hay señal.



Tarjeta de adaptación  
Salidas Digitales a 24V.  
Entrada VCC 24V  
GND  
Alimentación y comunicación USB RS232  
PIC18F2550

CH308 Connector (X13A)			
Logic Number	Connect Header	Name	Signal
20010	B1	External Start	IN
20011	A1	Low Air Pressure	IN
20012	B2	Call Master Job	IN
20013	A2	Alarm Error Reset	IN
20014	B3	---	IN
20015	A3	Select Play Mode	IN
20016	B4	Select Teach Mode	IN
20017	A4	---	IN
20020	B5	Interference 1	IN
20021	A5	Interference 2	IN
20022	B6	Work Prohibited	IN
20023	A6	Work Response	IN
	B7	0VU	
	A7	0VU	
30010	B8	Running	OUT
30011	A8	Servo is ON	OUT
30012	B9	Top Of Master Job	OUT
30013	A9	Alarm/Error Occured	OUT
30014	B10	Battery Alarm	OUT
30015	A10	Remote Mode Selected	OUT
30016	B11	Play Mode Selected	OUT
30017	A11	Teach Mode Selected	OUT
30020	B12	In Cube 1	OUT
30021	A12	In Cube 2	OUT
30022	B13	Work Home Position	OUT
30023	A13	Intermediate Start OK	OUT
	B14		
	A14		
	B15		
	A15		
	B16	0VU	
	A16	0VU	
	B17	0VU	
	A17	0VU	
	B18	+24VU	
	A18	+24VU	
	B19	+24VU	
	A19	+24VU	
	B20	FG	
	A20		

CH309 Connector (X13B)			
Logic Number	Connect Header	Name	Signal
20024	B1	---	IN
20025	A1	---	IN
20026	B2	Weaving Prohibited	IN
20027	A2	Sensing Prohibited	IN
20030	B3	IN17 General Input	IN
20031	A3	IN18	IN
20032	B4	IN19	IN
20033	A4	IN20	IN
20034	B5	IN21	IN
20035	A5	IN22	IN
20036	B6	IN23	IN
20037	A6	IN24	IN
	B7	0VU	
	A7	0VU	
30024	B8	Gas Shortage (Monitor)	OUT
30025	A8	Wire Shortage (Monitor)	OUT
30026	B9	Wire Shicking (Monitor)	OUT
30027	A9	Arc Shortage (Monitor)	OUT
30030	B10	OUT17-General Output	OUT
30031	A10	OUT18	OUT
30032	B11	OUT19	OUT
30033	A11	OUT20	OUT
30034	B12	OUT21	OUT
30035	A12	OUT22	OUT
30036	B13	OUT23	OUT
30037	A13	OUT24	OUT
	B14		
	A14		
	B15		
	A15		
	B16	0VU	
	A16	0VU	
	B17	0VU	
	A17	0VU	
	B18	+24VU	
	A18	+24VU	
	B19	+24VU	
	A19	+24VU	
	B20	FG	
	A20		

SEÑAL	ACTIVADA	DESACTIVADA	TIPO	BORNA
EXTERNAL HOLD	0	1	INTERRUPTOR	X18-X5-1y2
EXTERNAL START	1	0	PULSADOR	X13A-B1
CALL MASTER JOB	1	0	PULSADOR	X13A-B2

Figura 132. Sistema de comunicación con el robot

El software de comunicación se ha desarrollado en lenguaje C, integrándolo directamente sobre el programa de adquisición, que ya utilizaba el mismo lenguaje. Para facilitar la programación se ha contado con la librería de acceso libre *WiringPi*, que permite configurar los pines de la GPIO y efectuar la lectura y escritura de los mismos mediante funciones pre programadas.

Se ha establecido una comunicación serie de 8 bits, sin paridad y una velocidad de 115200 baudios, valor lo suficientemente alto como para que no represente un problema a la hora de transmitir los datos. Cabe recordar que la frecuencia de adquisición se había fijado en 2000 muestras/segundo, por lo que no fue necesario ningún tipo de procesamiento previo para evitar el colapso en el bus de comunicaciones, sino que se envía toda la información adquirida (marca de tiempo y valores de tensión y corriente) en tiempo real.

Como se puede ver en la Figura 133. Interfaz gráfica de la aplicación de monitorización de tensión y corriente, se ha modificado la interfaz de visualización para incluir un menú desplegable con el que se puede seleccionar el puerto COM correspondiente a nuestra conexión USB.

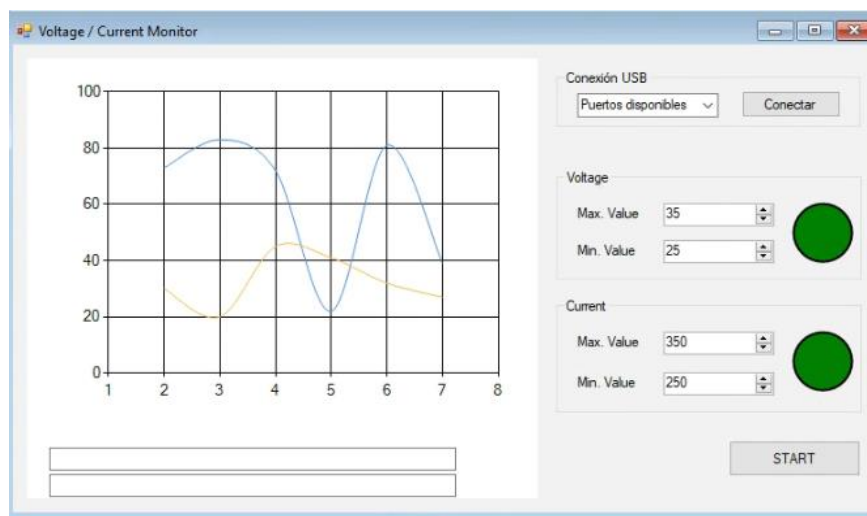


Figura 133. Interfaz gráfica de la aplicación de monitorización de tensión y corriente

Una vez seleccionado el puerto y definidos unos valores máximos y mínimos de tensión y corriente para un correcto funcionamiento, se puede dar inicio al proceso de monitorización pulsando el botón 'START'. En ese momento se envía un comando de inicio al software de adquisición, que comienza a almacenar la información en memoria interna y a transmitir esos mismos datos al ordenador para su representación. Se va actualizando la gráfica con los últimos valores recibidos, con el fin de no dificultar su correcta visualización.

Los iconos de alarma que notifican que alguna de las dos magnitudes muestreadas no se encuentran dentro del rango definido son reseteados pasados 60 segundos de su activación, siempre y cuando no se haya vuelto a sobrepasar alguno de los límites.

Por último, se han incluido un par de campos de control del estado del sistema. En ellos se indicarán distintos mensajes para guiar al usuario de la aplicación dentro del proceso. También se utilizan para mostrar posibles fallos que puedan surgir, tanto en el proceso de monitorización como en el propio hardware/software asociado al dispositivo desarrollado (fallo en las comunicaciones, valores de consigna fuera de los límites razonables,...)

Uno de los problemas detectados durante las pruebas realizadas con GTAW en cupones de Inconel ha sido el ruido detectado en las señales. En comunicación, se denomina ruido a toda señal no deseada que se mezcla con la señal útil que se quiere transmitir. Es el resultado de diversos tipos de perturbaciones que tienden a enmascarar la información cuando se presenta en la banda de frecuencias del espectro de la señal (véase Figura 134).

El ruido se debe a múltiples causas. En el presente proyecto, el sistema de soldadura por arco introduce interferencias en la tarjeta de adquisición de señales analógicas. El acoplo dominante es debido a que el campo eléctrico y magnético se propaga en forma combinada como ondas planas electromagnéticas, y en estos casos se habla de interferencias electromagnéticas o de radiación.

Es imposible eliminarlo totalmente, sin embargo, es posible limitar su valor mediante el uso de filtros de manera que la calidad de la comunicación resulte aceptable (véase Figura 135). Un filtro eléctrico o filtro electrónico es un elemento que discrimina una determinada frecuencia o gama de frecuencias de una señal eléctrica que pasa a través de él.

Existen distintos tipo de filtros, y va a ser necesario hacer un estudio específico para cada máquina y modo de soldadura de las frecuencias de las señales de corriente y tensión (véase la ventana de configuración de los filtros en la Figura 135) para la selección y la configuración de los mismos.

Tras analizar las señales obtenidas con la fuente GTAW al soldar el Inconel (véase Figura 134), se ha decidido usar un filtro pasa-bajos con una frecuencia de corte de 200Hz, el cual se caracteriza por permitir el paso de las frecuencias más bajas de 200Hz y atenuar las frecuencias más altas (debidas a las interferencias electromagnéticas del arco).

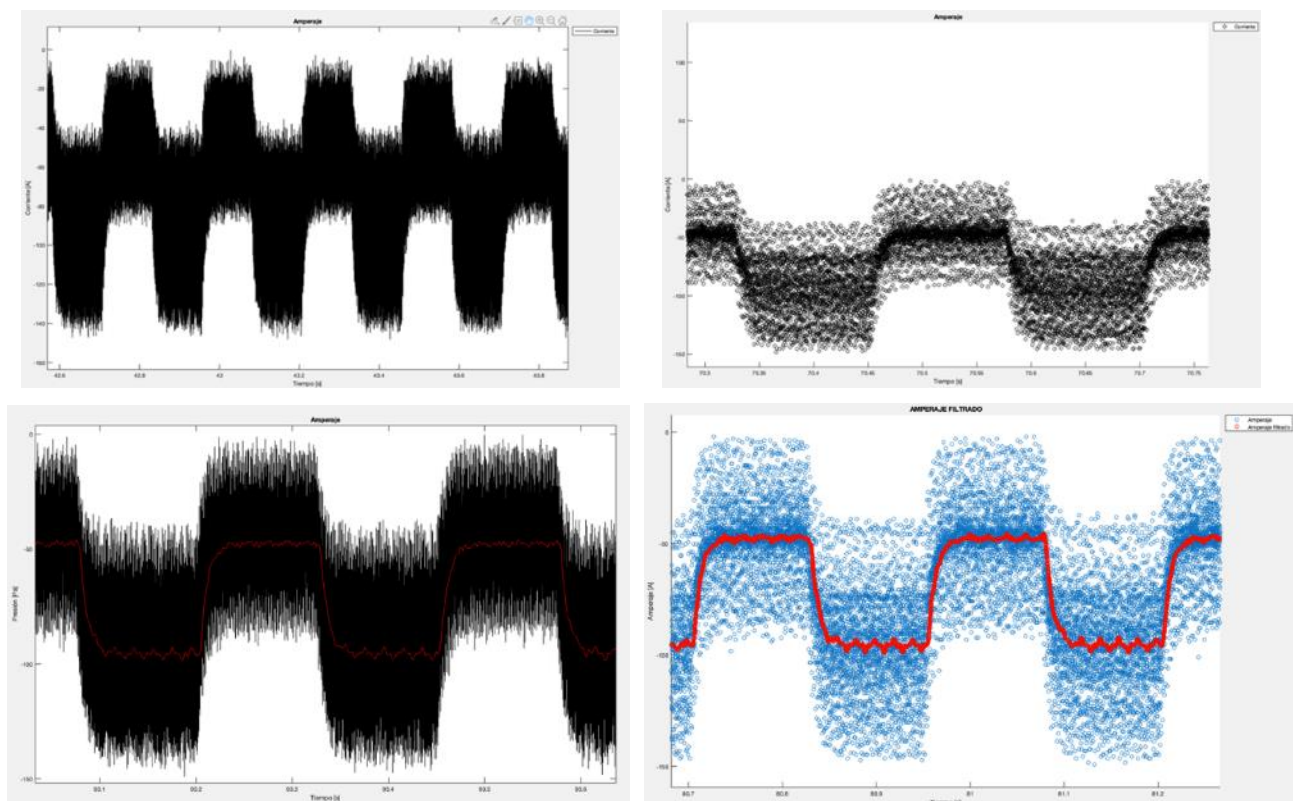


Figura 134. Izquierda: Señal obtenida en la medición de la corriente (A) durante la soldadura del cupón de Inconel. Derecha: nube de puntos. Debajo (en rojo): señal filtrada.

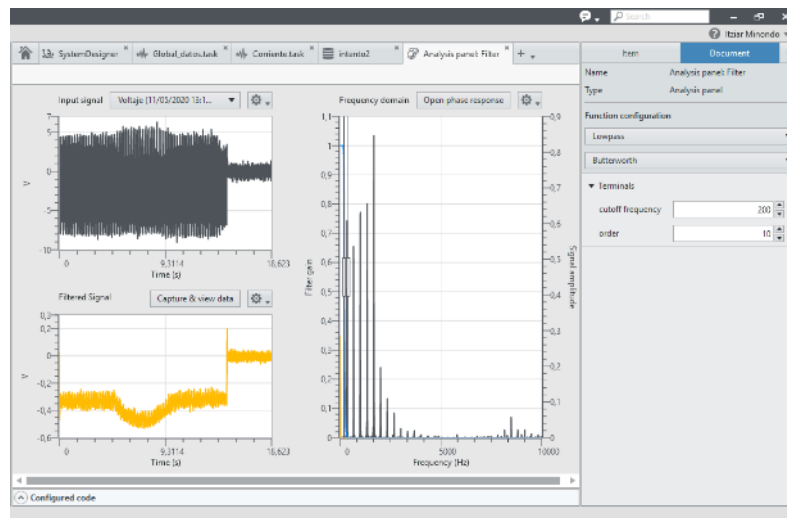


Figura 135. Programación del filtrado de la señal de tensión durante la soldadura del cupón de Inconel. Arriba señal bruta, abajo señal filtrada

Tras la incorporación de los filtros necesarios para la correcta adquisición de la señales la configuración final del sistema de control sería la mostrada en la Figura 136.

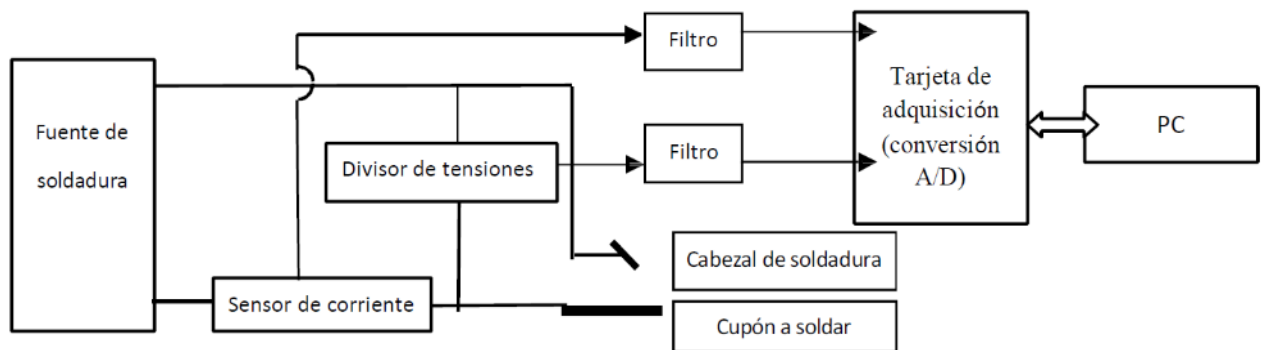


Figura 136. Esquema de la configuración utilizada para las pruebas del sistema de control de la soldadura de los cupones de Inconel

El último paso en las pruebas del sistema de control en las pruebas de soldadura de los cupones de Inconel ha sido fijar los valores máximos admitidos para las dos variables. Para ello se han hecho pruebas para determinar los parámetros óptimos. Una vez obtenidos, durante la soldadura de un cordón se ha variado el stick out (distancia entre el cabezal y la pieza) de los más corto a lo más largo posible sin que aparezcan defectos determinado de ese modo los valores límite. Al tratarse de máquinas de soldadura sinérgicas, al modificar la distancia entre el cabezal y la pieza los parámetros eléctricos se modifican automáticamente de modo que se mantenga el arco.

Tal como se puede observar en la Figura 137, la tensión correspondiente al arco más corto posible, con una calidad aceptable de soldadura, ha correspondido a unos 11V, mientras que el valor correspondiente al arco más largo admisible ha sido de unos 13.5V. En consecuencia, los valores máximo y mínimo de tensión en la soldadura de Inconel se han establecido en 14V y 10.5V respectivamente.

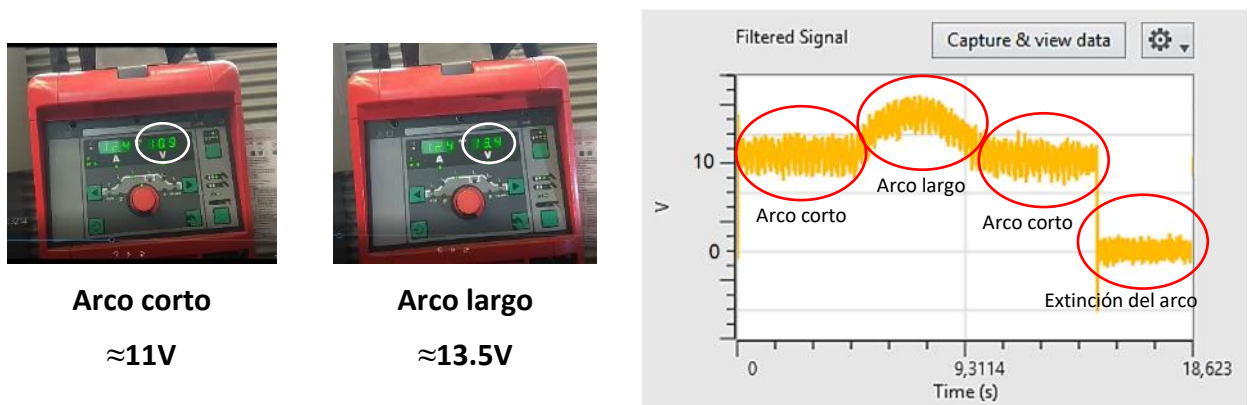


Figura 137. Variaciones de la señal de la tensión durante la variación del stick-out en las pruebas de soldadura del cupón delInconel.

Una vez definidos unos valores máximos y mínimos de tensión y corriente se da inicio al proceso de control pulsando el botón 'START', en ese momento se inicia la adquisición. En el momento en que un valor de las dos magnitudes muestreadas se sale del rango definido, en el campo de control del estado del sistema (véase Figura 133) aparece un mensaje de fallo y se envía una señal a la bornera de la controladora de la celda que para el robot y la fuente de soldadura (extinción del arco).

Los resultados experimentales obtenidos en las pruebas han demostrado la viabilidad del sistema para adquisición de las señales del arco con precisión, así como método de control en línea de la estabilidad del proceso de soldadura.

### Tarea 3. Estudio de viabilidad del control del proceso mediante espectrometría acústica

Cuando se trata de las características dinámicas, especialmente cerca del arco, debido a la alta temperatura, formación de salpicaduras y generación de humos la detección acústica ha resultado ser una herramienta útil.

En el estudio se han realizado realizar grabaciones de procesos sin defectos y con defectos inducidos, con el objetivo de determinar si dichos defectos producen como se espera un cambio de sonido. Se ha llevado a cabo la monitorización del proceso de soldadura mediante la medición de no sólo las ondas acústicas producidas por los cambios de presión que ocurren durante el proceso, sino también, deformaciones, temperaturas y vibraciones.

Los datos obtenidos han sido procesados para obtener las características de la señal. Se ha fragmentado la señal, y sobre esos trozos se ha aplicado la transformada de Fourier.

#### Equipos utilizados (CompactDAQ, tarjetas, sensores, etc.)

La primera parte de la tarea ha sido la selección del equipamiento, lo más sencillo y económico posible, que proporcione una solución permita la realización de medidas eléctricas y físicas necesarias y sea compatible con un amplio conjunto de hardware y software.

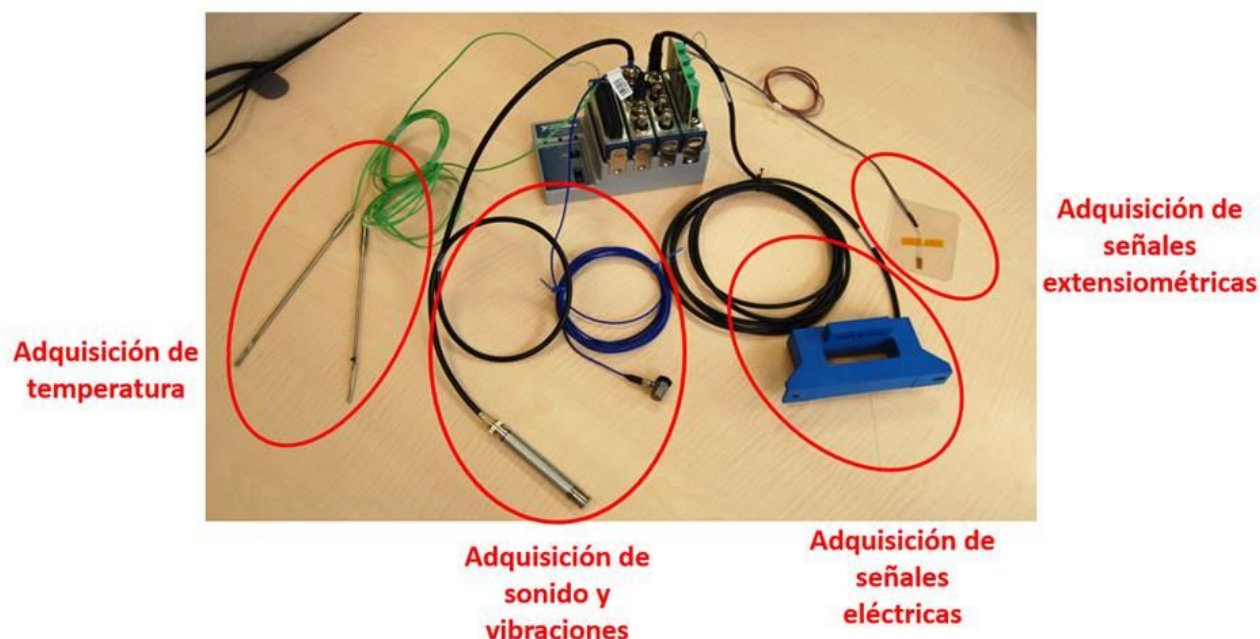


Figura 138. Configuración del sistema utilizado para la adquisición de señales

La plataforma seleccionada para la adquisición pertenece a la serie CompactDAQ de National Instruments e integra hardware para E / S de datos con el software LabVIEW para permitir recopilar, procesar y analizar datos de sensores siendo menos costosa que la mayor parte de los sistemas comerciales equivalentes.

Para la adquisición de temperaturas se ha recurrido al módulo NI 9213 de la Serie C de National Instruments de 16 canales. El NI-9213 es un módulo de entrada de termopares de alta densidad que está diseñado para sistemas con mayor número de canales. Incluye filtros anti-aliasing, detección de termopares abiertos y compensación de unión fría para medidas de termopares de alta precisión. El NI-9213 tiene certificados de calibración trazable expedidos por el NIST y doble barrera de aislamiento de canal a tierra para seguridad, inmunidad a ruido y alto rango de voltaje de modo común. Los termopares utilizados han sido tipo "K" (2hilos  $\varnothing 0,5$  mm).

Para las señales de sonido y vibración se ha montado el módulo NI 9234 de la Serie C de National Instruments de 4 canales. Se trata de un módulo de adquisición de señal dinámica de alta precisión. El NI 9234 ofrece 102 dB de rango dinámico e incorpora acondicionamiento de señal piezoeléctrico de electrónica integrada (IEPE) a una corriente constante de 2 mA para acelerómetros y micrófonos. Los cuatro canales de entrada adquieren simultáneamente a velocidades de hasta 51,2 kS / s. Además, el módulo incluye filtros anti-aliasing integrados que se ajustan automáticamente a su frecuencia de muestreo.

El micrófono conectado a dicho módulo ha sido del tipo 4966-H-041 de Brüel&Kjaer. Se trata de un micrófono robusto de campo libre, con alta sensibilidad y de 1/2 pulgada con preamplificador de alta temperatura tipo 1706. Está diseñado para trabajar en un ancho de banda completo de 20 kHz y usarse en escenarios de mediciones de sonido de precisión, medidores de nivel de sonido de clase premium y para medición electroacústica incluso en entornos con alta humedad.

El preamplificador de micrófono CCLD de alta temperatura Tipo 1706 permite realizar mediciones acústicas a temperaturas de hasta 125 °C con un módulo de entrada de unidad de línea de corriente constante (CCLD). La baja impedancia de salida del preamplificador permite el uso sin problemas de cables de extensión largos. El diseño robusto y compacto permite su uso en una amplia gama de condiciones ambientales. Está diseñado para usarse en escenarios de mediciones de análisis de señal multicanal, de potencia acústica multicanal y de ruido de maquinaria industrial.

El acelerómetro usado ha sido el modelo 352c33 de la marca PCB de Piezotronics. Se trata de un sensor de vibraciones de alta sensibilidad con un tamaño y masa reducidos y capaz de medir desde 0 Hz hasta 60 kHz. Se trata de un acelerómetro diseñado especialmente para trabajar en entornos industriales donde se valora la resistencia además de la precisión técnica.



Preamplificador Tipo 1706

Micrófono Tipo 4966

Acelerómetro PCB PIEZOTRONICS 352C33

Figura 139. micrófono y acelerómetro utilizados para la adquisición de señales

El módulo utilizado para la adquisición de la señales extensiométricas ha sido el NI 9237. Se trata de un módulo de entrada de puente/tensión de la Serie C de National Instruments de 4 canales. La alta velocidad de muestreo y el ancho de banda del NI 9237 ofrecen un sistema de medición de tensión o carga de alta calidad y alta velocidad con cero retardos de fase entre canales.

Para la conexión con el sistema de control por parámetros eléctricos, señales analógicas, se ha utilizado el módulo NI 9775.

### Adquisición de señales (software y programación)

Tal como se ha comentado el software utilizado para la programación de la adquisición de datos, el control de los instrumentos y el registro de datos ha sido el software Labview 8.2.

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) fue creado por National Instrument, NI, en 1986. Se trata de una plataforma y entorno de desarrollo integrado para desarrollar programas informáticos mediante un enfoque de lenguaje de programación gráfico que permite visualizar cada aspecto de la aplicación, incluyendo configuración de hardware, datos de medidas y depuración. También va a hacer que sea más fácil integrar hardware de diferentes proveedores, representar una lógica compleja en diagramas, desarrollar algoritmos de análisis de datos y diseñar interfaces de usuario totalmente personalizadas.

El programa ha sido diseñado en lenguaje de programación de bloques, se muestra en la Figura 140. El interfaz de usuario se muestra en la Figura 141. En los gráficos situados en la zona de la derecha se representan las señales de los sensores en tiempo real de los últimos 10 segundos, mientras que en los de la izquierda, se muestran las señales registradas totales del cordón que se está registrando en ese momento.

Antes de iniciar la soldadura de la pieza, se debe asignar un nombre para su registro, el cual se va a mostrar en el bloque de información situado en la zona superior. Los datos registrados son almacenados en un archivo formato ".txt" que, por defecto, va a ser guardado en la ruta: "/Users/NombreUsuario/Desktop/RegistroDatos/NombrePieza.txt", la ruta también se muestra en el bloque de información.

Se tiene la posibilidad de registrar los diferentes cordones de soldadura en archivos diferentes para facilitar su posterior análisis, para ello, simplemente hay que pulsar sobre el botón "NUEVO CORDÓN" y, el programa, de forma automática, empieza a registrar los datos en un nuevo archivo, los cuales se guardan con el siguiente formato de nombre: "NombrePieza\_YY-MM-DD\_HHMM\_xxx.txt". De esta manera, se facilita la búsqueda y localización de los diferentes cordones de los ensayos realizados.

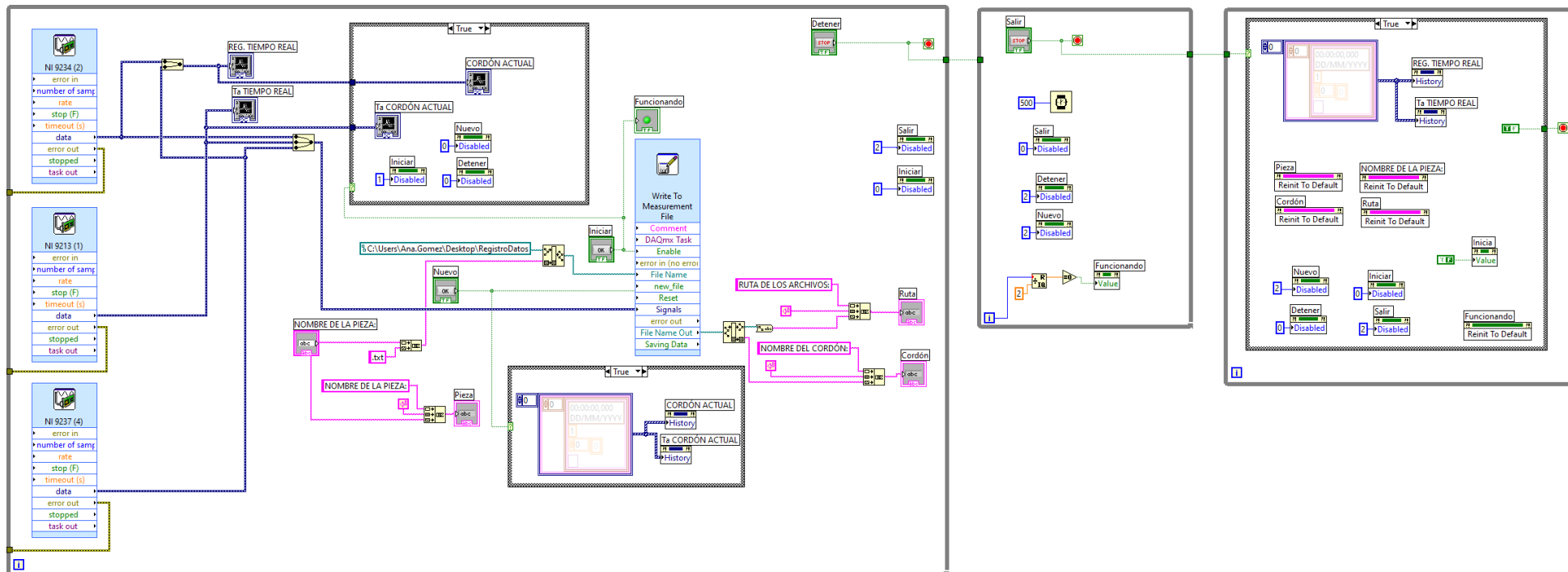


Figura 140. Programa para la adquisición de datos (Labview 8.2)

- Interfaz gráfica para interactuar con el usuario



Figura 141. Interfaz de usuario diseñada

La configuración de las galgas seleccionada ha sido de medio puente wheatstone, con la galga longitudinal montada en la línea central (eje de simetría de la pieza) a fin de evitar que sus mediciones se vean afectadas por cargas torsionales y con la galga transversal (de “Poisson”) colocada adyacente para conseguir anular los cambios de resistencia por orígenes termales distintos.

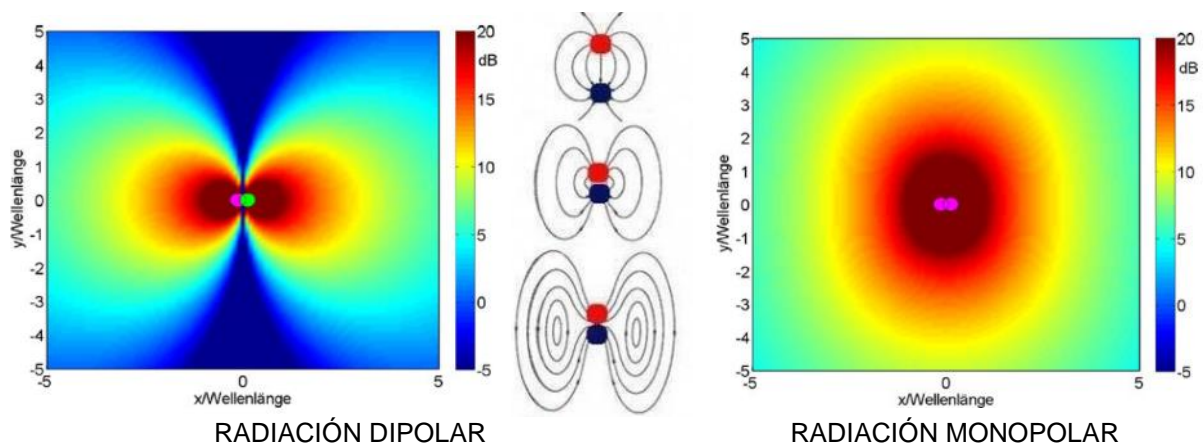


Figura 142. Esquema del comportamiento de una señal electromagnética.

Para decidir la mejor ubicación del micrófono de campo libre ha sido necesario analizar el comportamiento electromagnético del arco.

La radiación procedente de una antena de dipolo se denomina radiación dipolar eléctrica. Muchas ondas electromagnéticas presentan las características de la radiación dipolar eléctrica. Una característica importante de este tipo de radiación es que la intensidad de la onda electromagnética radiada por una antena dipolar es cero a lo largo del eje de la antena y máxima en las direcciones perpendiculares al eje de la misma tal como se muestra en la imagen izquierda de la Figura 142. Ha sido necesario investigar si el arco se comporta como un dipolo para evitar colocar el micrófono en lo que en acústica se conoce como una zona muerta.

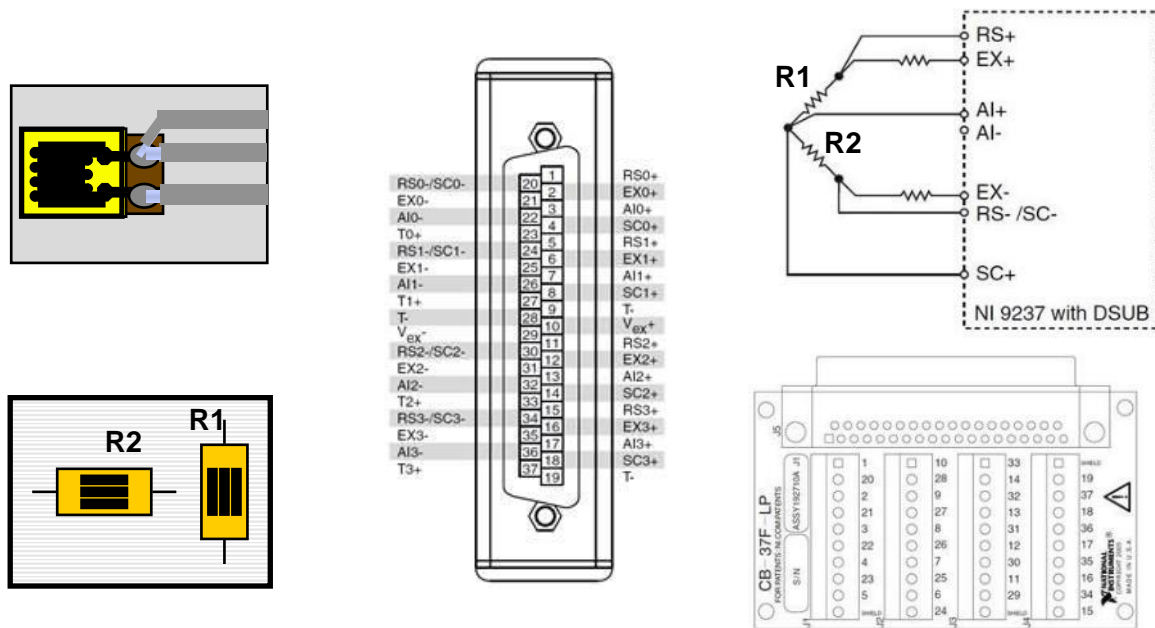
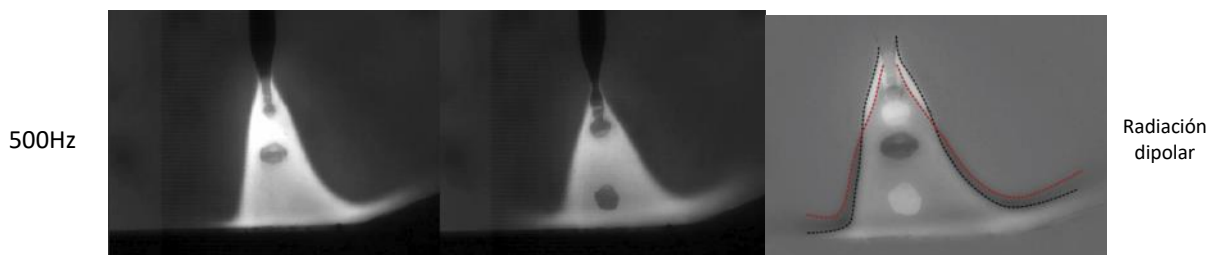


Figura 143. Esquema de conexionado de las galgas al módulo NI9237 con DSUB en medio puente

Tras un estudio realizado a tres frecuencias (Véase Figura 144) se ha podido determinar de a qué frecuencias de soldeo superiores a 1000Hz las gotas desprendidas son lo suficientemente continuas como para considerar que el arco se comporta como un monopolo, lo que garantiza un frente de onda omnidireccional y por consiguiente el micrófono puede colocarse en el propio cabezal de soldeo.



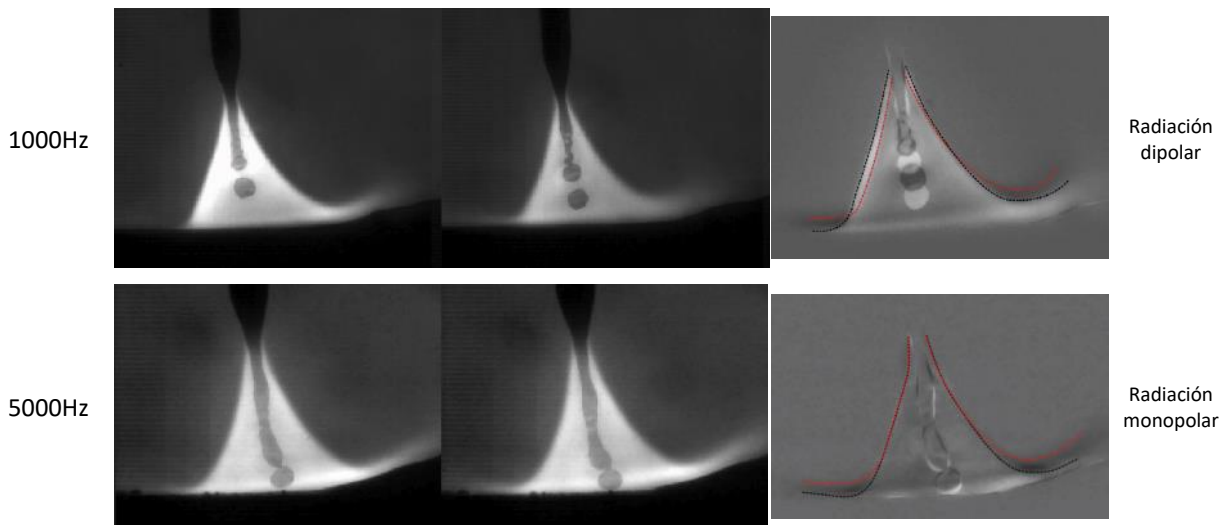


Figura 144. Esquema del comportamiento electromagnético del arco de soldadura

El diseño del sistema de adquisición con todos los sensores se muestra en la Figura 145. La ubicación del acelerómetro así como de las galgas y de los termopares dependerá de la geometría de la pieza.

Como regla general el acelerómetro deberá de estar lo más lejos posible de los anclajes de la pieza y roscado a la misma (cualquier adhesivo se vería afectado por el calor) y los termopares deberán ser soldados a unos 10mm de la pieza lo más simétricos y uniformemente distribuidos posible.

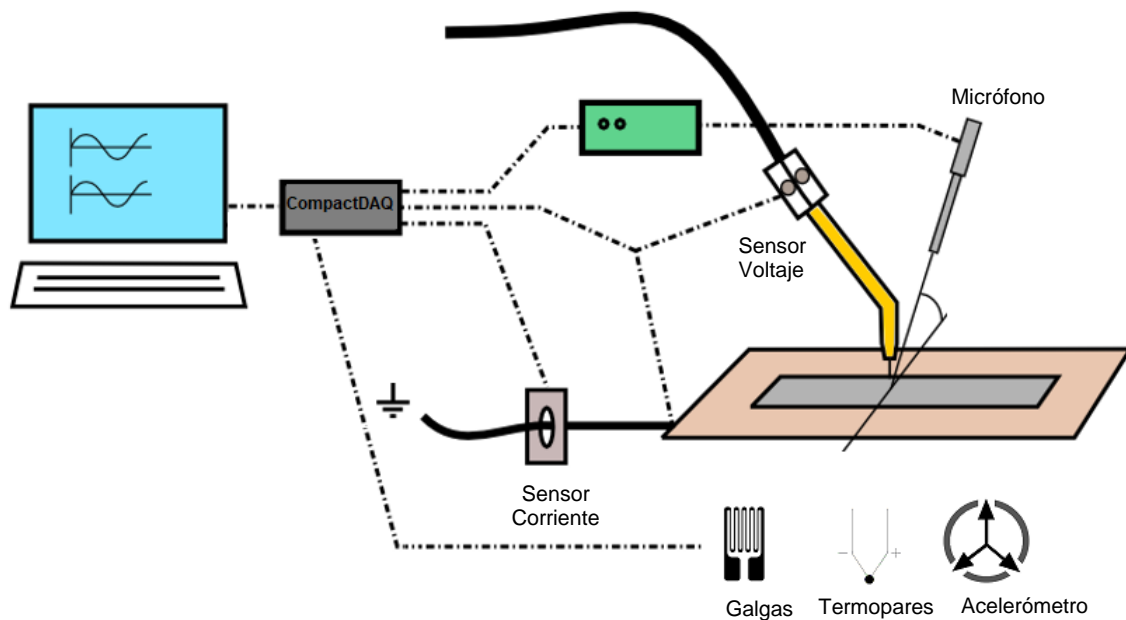


Figura 145. Diseño de la instrumentalización de los cupones de soldadura

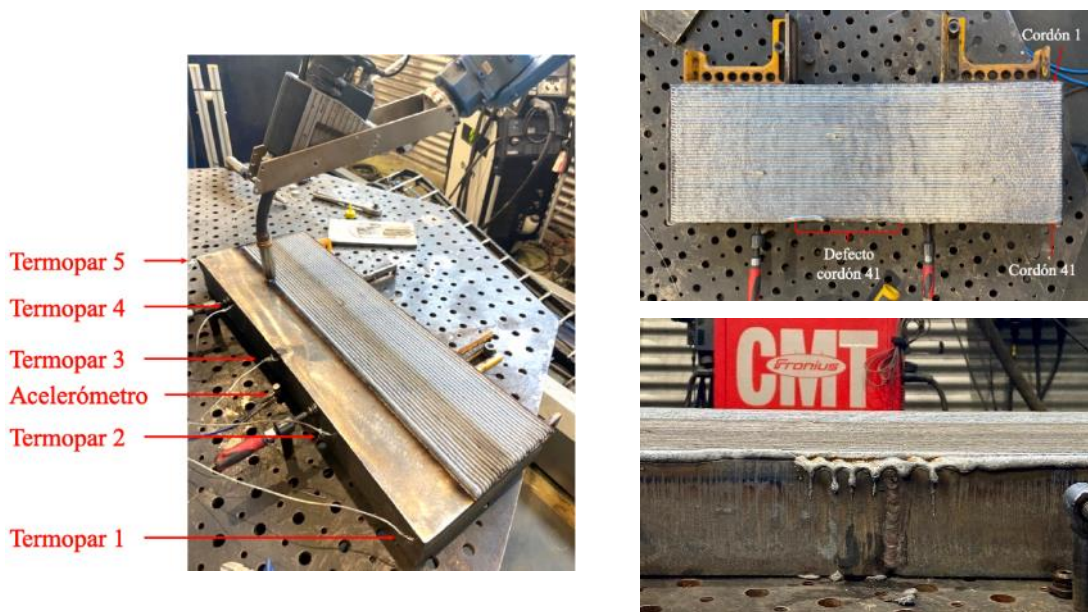


Figura 146. Posición de los termopares soldados en el primer cupón instrumentado

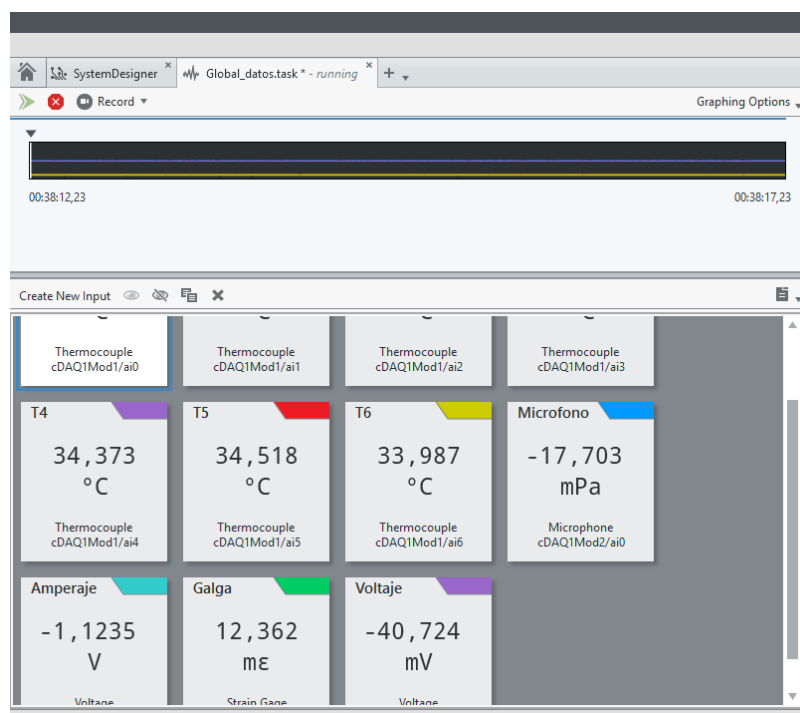


Figura 147. Monitorización de las señales en línea

La normativa de referencia para la medición de vibraciones y de ruido ha sido:

- 012096NENN100\_Vibraciones mecánicas. Declaración y verificación de los valores de emisión vibratoria.pdf
- 074105NUNE100\_Acústica. Métodos estadísticos para la determinación de emisión acústica.pdf
- 074105NUNE101\_Acústica. Métodos estadísticos para la determinación de emisión acústica.pdf

En la primera prueba llevada a cabo para la puesta a punto del sistema, de los 6 termopares conectados solo se ha hecho uso de los 5 que se han soldado (S4-S8), ya que el restante (S3) es de contacto. Los 5 termopares se han soldado equidistante entre ellos, aproximadamente a 177 mm, en la zona longitudinal de la pieza más próxima al último cordón, tal y como se puede apreciar en la Figura 146. El termopar 1 es el situado al inicio del cordón y el termopar 5 el situado al final del cordón.

El acelerómetro ha sido sujeto a la mesa de trabajo mediante cera de abeja en la misma cara en la que se han situado los termopares. No se ha colocado directamente sobre la pieza ya que la temperatura máxima de funcionamiento de este acelerómetro es de 163 °C, y en toda la pieza se van a alcanzar temperaturas superiores. Durante el transcurso del ensayo, se ha podido ver como la cera de abeja se ha derretido, lo que ha hecho que la posición inicial y la estabilidad del acelerómetro se vean afectadas, por lo que ciertos registros no son válidos. Debido a que no se sabe a partir de que cordón se ha visto afectado el acelerómetro, todos los datos registrados con él van a ser despreciados, no obstante, los registros de los primeros cordones se podrían ser analizados para comprobar si hay semejanza entre ellos, ya que el acelerómetro no se ha visto afectado.

Como posible solución para próximos ensayos, se podría optar por situar el acelerómetro sobre una plancha de cobre electrolítico refrigerada compacta de dimensiones 207x195x30 mm sobre la que se apoyaría y fijaría la pieza a soldar y, situar un termopar soldado junto al acelerómetro, para comprobar que no se alcanzan los 70 °C, ya que es la temperatura máxima de utilización de la cera de abeja. Como mejora adicional, también se podría optar por remplazar la base de montaje adhesiva que tiene actualmente el acelerómetro por un imán de superficie plana u optar por atornillar directamente el acelerómetro sobre la pieza refrigerada, lo que permitiría que el acelerómetro pudiese estar situado en zonas de mayor temperatura.

Por último, se tiene la galga extensiométrica, que no se hecho uso de ella durante este ensayo, por lo que sus registros van a ser despreciados.

Este ensayo fue realizado bajo condiciones de un entorno ruidoso (puente grúa, radial, equipos de soldadura, fuerte lluvia...).

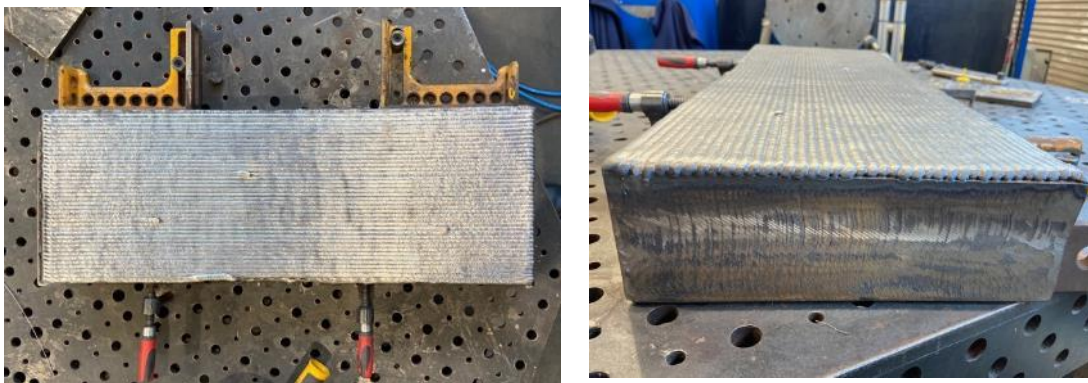


Figura 148. Resultado final del ensayo de la pieza A

Se han realizado un total de 41 cordones de soldadura. El resultado final tras haber limpiado la pieza con el cepillo de la radial se muestra en la Figura 148.

Durante el ensayo se ha detenido el robot en tres ocasiones, más concretamente en el cordón 15, en el cordón 26, y en el cordón 18, tal como se muestra en la Figura 149. Se han producido a una distancia respecto del inicio del cordón de 410 mm, 540 mm y 115 mm respectivamente. Las paradas del robot han sido debidas a fallos en la fuente de soldadura.



Figura 149. Defectos instrumentalizados en el cupón de pruebas A

La falta de paralelismo entre las caras de las piezas, ha hecho que en el último cordón, 41, se haya producido un desprendimiento de material en la zona central de la pieza, a unos 310 mm del inicio del cordón, y ha tenido una longitud de aproximadamente unos 100 mm de longitud, Figura 149.

### Tratamiento de señales (software y programación)

El procesamiento de señales ha sido realizado con MATLAB®. Se trata de un software que permite realizar todas las etapas del desarrollo, desde el análisis de las señales y la exploración de los algoritmos hasta la evaluación de los tradeoffs en la implementación de los diseños para la creación de sistemas de procesamiento de señales en tiempo real.

MATLAB ofrece funciones y apps integradas para el análisis y el preprocesamiento de datos de series temporales y el análisis espectral, apps y algoritmos para diseñar, analizar e implementar filtros digitales, un entorno para modelizar y simular sistemas de procesamiento de señales con una combinación de programas y diagramas de bloques y herramientas para desarrollar modelos predictivos con señales y datos de sensores mediante flujos de trabajo de machine learning y deep learning.

A la hora de realizar el tratamiento de las señales acústicas se han distinguido dos tipos de fuentes sonido (Figura 150), considerando el sonido primario como aquel relacionado con el arco de soldadura:

Sonido primario:

- Encendido y extinción del arco.
- Cambios de energía eléctrica en el arco.

Sonido secundario:

- Oscilación de la torcha
- Oscilación del “stick out” del hilo

- Oscilación del baño y de la pieza

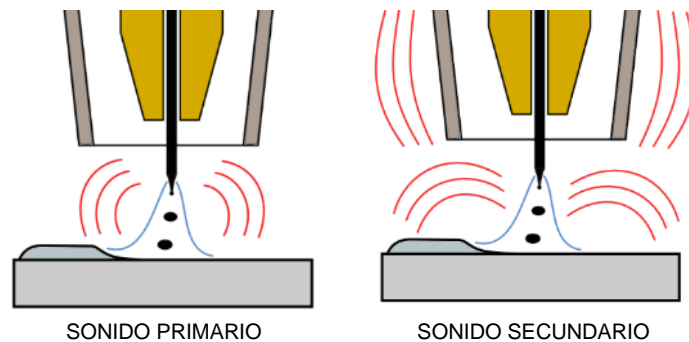


Figura 150. Tipos de sonidos identificados y clasificados

El procedimiento para el análisis de los datos acústicos se ha basado en el análisis en frecuencia de las ondas acústicas es decir, de las variaciones de presión producidas en un medio (sólido, líquido o gaseoso) por un elemento que vibra y que el oído humano puede detectar. La variación de presión de sonido más simple produce la formación de una onda sinusoidal como la representada en la Figura 151.

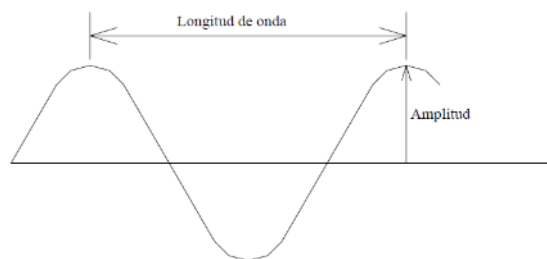


Figura 151. Onda de Presión con forma sinusoidal

Dado que las variaciones de presión audibles se encuentran en una gama muy amplia, variando entre  $20 \mu\text{Nw/m}^2$  y  $108 \mu\text{Nw/m}^2$ , para la medición de la amplitud de la onda de la presión sonora se ha adoptado una unidad logarítmica llamada DECIBELIO (dB) en la que interviene una magnitud de referencia, que es precisamente la mínima presión audible o presión de umbral.

$$dB = 20 \log \frac{P}{P_0} = 10 \log \frac{W}{W_0}$$

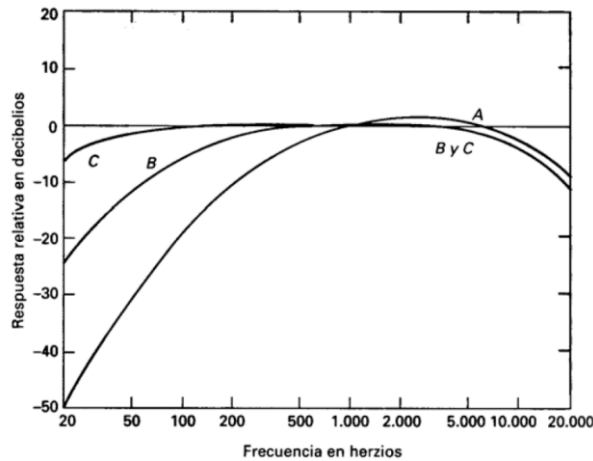
$$P_0 = 20 \mu\text{Nw/m}^2 = 20 \mu\text{Pa. (Presión)}$$

$$W_0 = 10^{-12} \text{ vatios (Potencia)}$$

Dada la amplia banda o gama de frecuencias audibles, para realizar estudios de ruido no es posible analizarlas una a una, por lo que ha sido dividida dicha banda en 10 bandas más pequeñas denominadas OCTAVAS que se denominan y conocen por su frecuencias centrales: 31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2.000, 4.000, 8.000 Hz. Para estudios de mayor precisión, se definen bandas de menor ancho, denominadas TERCIOS de OCTAVA, a saber 1/3 de las bandas anteriores.

El análisis de frecuencia de bandas de octava es necesario para investigar una fuente sonora. Puesto que el oído humano no tiene la misma sensibilidad para todas las frecuencias, resulta lógico que al tratar de reproducir la capacidad del soldador de detectar según el ruido que hace el equipo que algo va mal, se tenga en cuenta esta particularidad.

Para ello, se establecen y se han normalizado diferentes CURVAS de PONDERACION (Figura 152), las cuales siguen aproximadamente la misma ley que el oído en cuanto a sensibilidad en función de la frecuencia.



Frecuencia, Hz	Ponderación A, dB
31.5	-44.7
63	-26.2
125	-16.1
250	-8.6
500	-3.2
1000	0
2000	1.2
4000	1
8000	-1.1

Figura 152. Curva de ponderación utilizada

El nivel sonoro más utilizado es con Ponderación A, por lo que cuando el nivel sonoro este ponderado se suele representar el valor acompañado con dB(A), obteniéndose así los Niveles sonoros ponderados. Los valores de la curva están recogidos en la tabla de la Figura 152 para la ponderación A con respecto a las frecuencias más utilizadas.

Para el análisis de la señal ha sido necesario pasar de una señal adquirida en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia (véase Figura 153), para ello se ha recurrido a la transformada de Fourier, una transformación matemática que es reversible, siendo capaz de transformarse en cualquiera de los dominios al otro. En el caso de una función periódica, como la señal sonora del arco de soldadura, la transformada de Fourier se puede simplificar para el cálculo de un conjunto discreto de amplitudes complejas, llamado coeficientes de las series de Fourier. Ellos representan el espectro de frecuencia de la señal del dominio-tiempo original.

En la Figura 153, en la zona de la izquierda se muestra la representación en el tiempo de las señales de Corriente, Tensión y Presión sonora. En la zona de la derecha se muestra la representación de la amplitud de onda de la presión para distintas frecuencias dividida en tramos de 50 ms de duración.

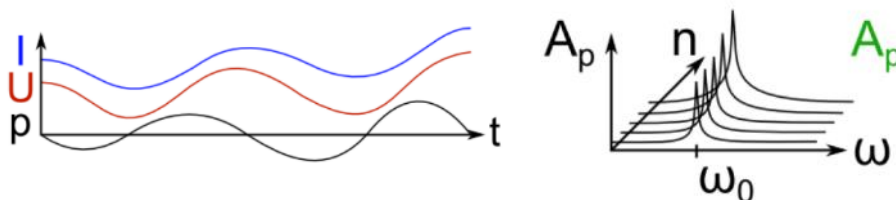


Figura 153. Izq. Representación en el tiempo de las señales de Corriente, Tensión y Presión sonora; Dcha. Representación de la amplitud de onda de la presión para distintas frecuencias

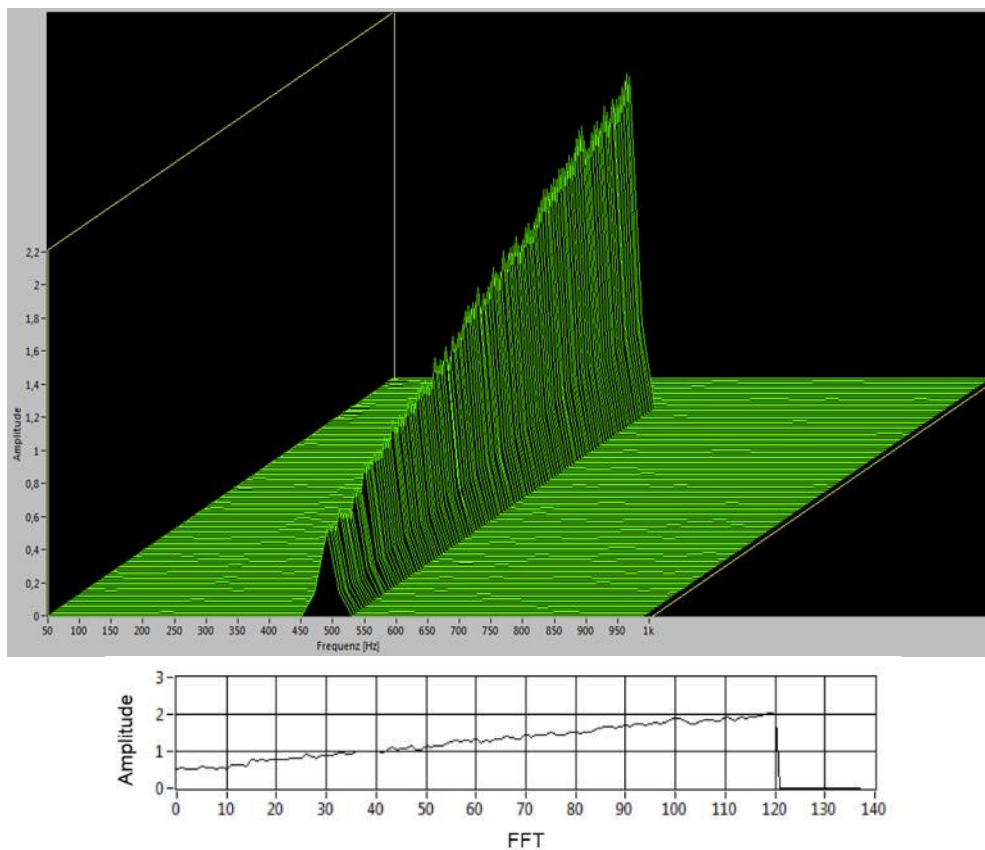


Figura 154. Transformada de Fourier de amplitud correspondiente a 500Hz durante la duración de la medición

### Resultados obtenidos

En la Figura 155 se muestran las gráficas obtenidas en los cordones escogidos como referencia para el estudio, en las que se ve una gran diferencia entre el cordón sin defectos (1) y en el que se ha producido defecto (41):

- Cordón 1: se trata de un cordón sin ningún tipo de fallo aparente.
- Cordón 41: se trata de un cordón que presenta defectos visuales en la zona central del cordón.

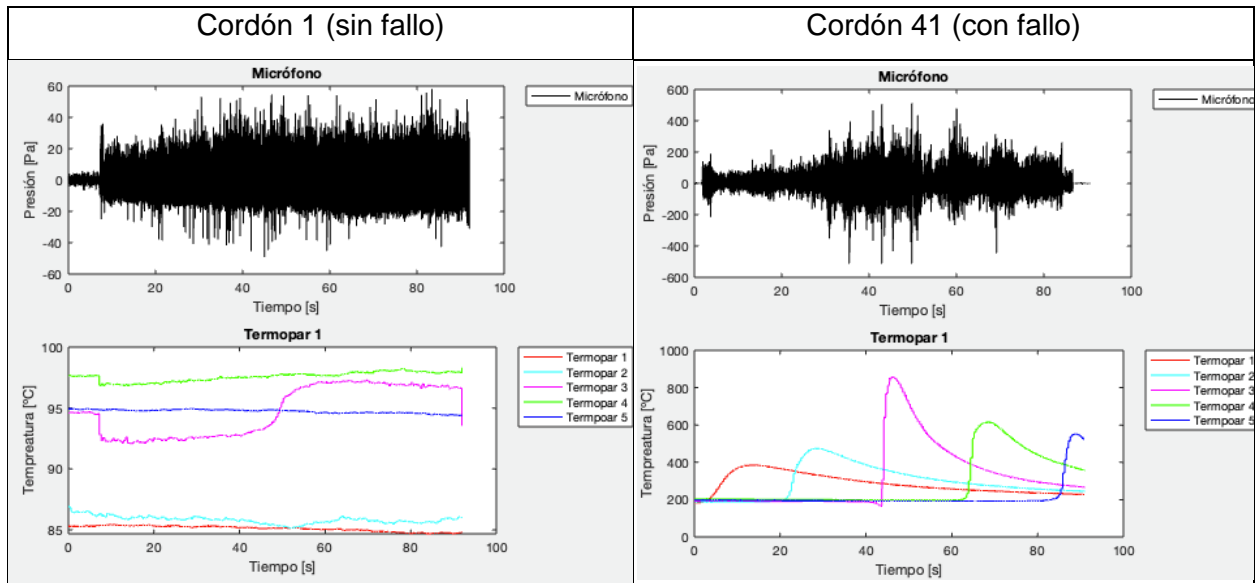


Figura 155. Gráficas obtenidas en la prueba de puesta a punto de los sensores

En la Figura 156 se muestra la señal adquirida en la prueba A durante de los cordones 1 y 41 respectivamente en el dominio de la frecuencia.

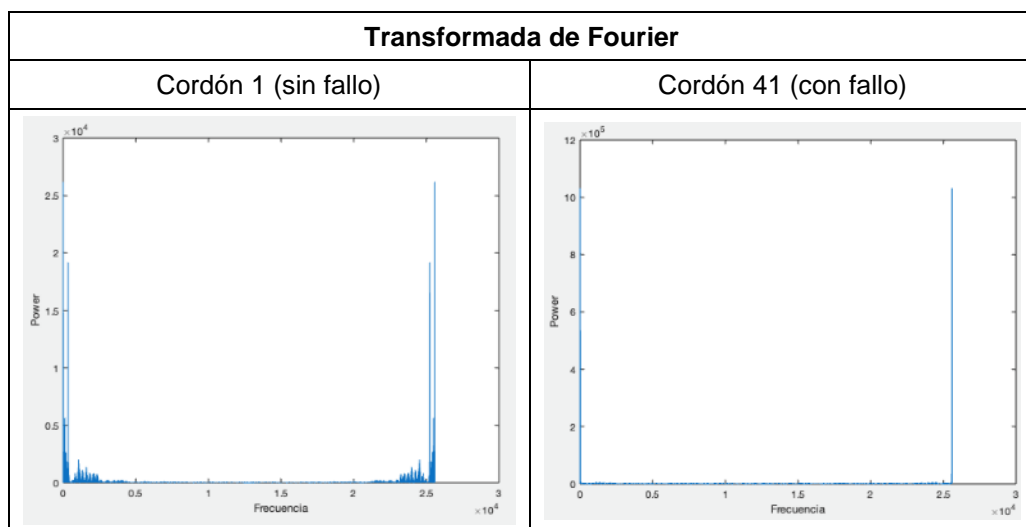


Figura 156. Mediciones de las ondas acústicas realizadas pasadas al dominio de frecuencias

En la Figura 157 se muestran las mismas señales en el 1/3 de octava dónde se aprecia una mayor diferencia y en la Figura 158 se muestra la ponderación A de las gráficas anteriores.

Una vez analizadas las gráficas obtenidas, comparando los espectros con ponderación A sin y con defecto se observa que en ambos casos se tiene una campana de Gauss similar con la excepción de que en el caso de existir un defecto se observa un aumento de 10 dB en frecuencias que van desde 1 a 12kHz.

Aunque parezca una diferencia pequeña, dos belios representan un aumento en un factor cien en la potencia, tres belios equivalen a un aumento de mil veces y así sucesivamente.

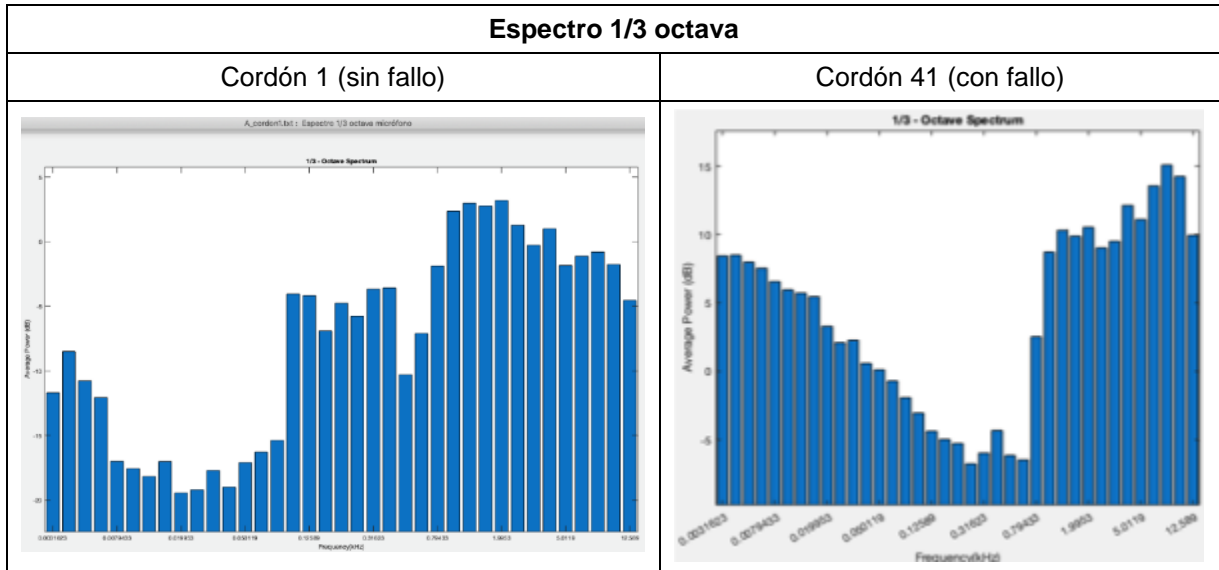


Figura 157. Espectros correspondientes a las mediciones de las ondas acústicas realizadas

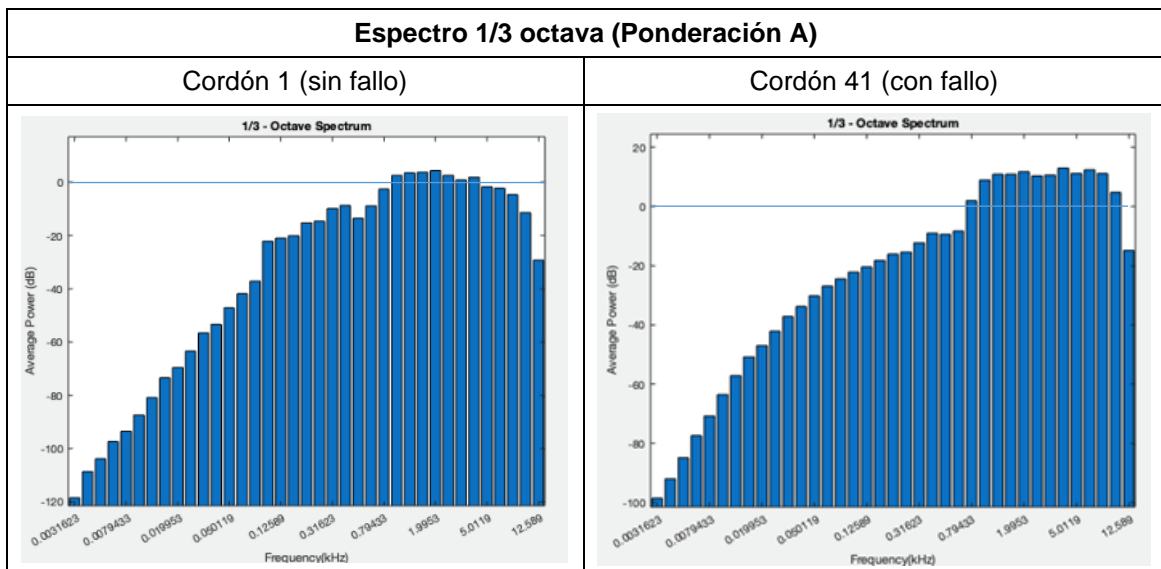


Figura 158. Mediciones de las ondas acústicas realizadas pasadas al dominio de frecuencias y ponderadas

Analizando los resultados buenos resultados obtenidos que demuestran la posibilidad de desarrollar un sistema de control del proceso basándose en la señales acústicas ponderadas (A) se ha decidido conectar (mediante la tarjeta NI 9775) este sistema con el de control de los parámetros eléctricos y desarrollar un sistema de control que tenga en consideración los dos tipos de señales.

## HITO 5. FABRICACIÓN DE DEMOSTRADORES DE LATTICES MEDIANTE MÉTODOS AVANZADOS DE SOLDEO

### Tarea 1. Fabricación de demostradores de peso reducido (lattices)

Para la ejecución de esta tarea se realizó en primer lugar, la elección de las geometrías de los demostradores, para ello se han analizado diferentes geometrías comerciales que se pueden encontrar en el mercado, como los tradicionales lattices de forma de cubo, características de las máquinas de impresión 3D, también denominadas “panel de abeja”.

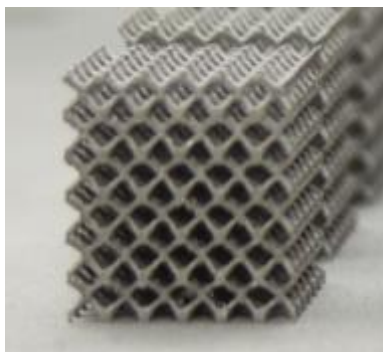


Figura 159. Geometría de panel de abeja.

Se ha empezado haciendo pruebas para la geometría de la celda básica.

Se ha partido de tres modelos distintos, uno de 4 apoyos (tipo árbol), otro de 2 apoyos con un refuerzo intermedio (biapoyada) y por último, uno de un único apoyo. Posteriormente se ha llevado a cabo la caracterización de estas estructuras. Concretamente, para la fabricación de las probetas se ha elegido una geometría de celda a  $45^\circ$  para la estructura de “árbol” y una geometría de celda a  $60^\circ$  para la estructura “biapoyada”.

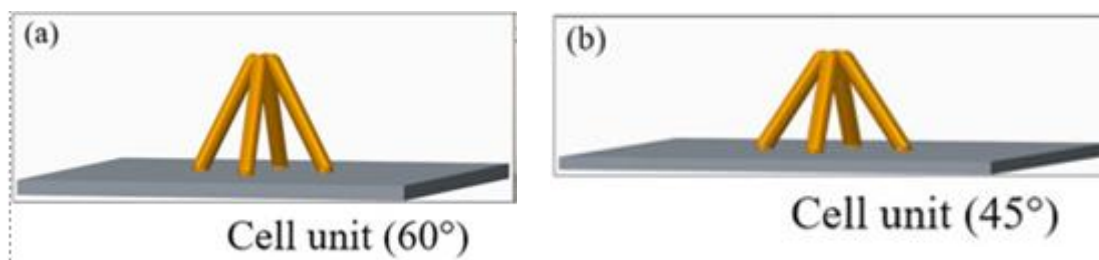


Figura 160. (a) Cell unit  $60^\circ$ , (b) Cell unit  $45^\circ$ .

Adicionalmente, como ejemplo de aplicación para generar geometrías de mayor rigidez estructural, se ha decidido optar por generar paredes verticales conectadas entre ellas mediante filamentos individuales. El objetivo es analizar una estructura “sencilla” similar a las estructuras de “panel de abeja” a las que se hace referencia en el párrafo anterior.

Para llevar a cabo la fabricación de las geometrías seleccionadas, se han realizado una serie de ensayos con el objetivo de obtener unos parámetros de referencia para comenzar a fabricar los demostradores, a partir de los cuales poder fabricar demostradores con diferentes geometrías. Como condición de referencia para la selección de los parámetros de fabricación se ha tenido en cuenta la necesidad de emplear espesores reducidos con unos objetivos de aproximadamente 3.5 - 4 mm (Figura 161) para conseguir la mayor similitud posible con las condiciones de los lattices de geometría tradicional.



Figura 161. Espesor constante de la celda tipo lattice: 4mm



Figura 162. Pruebas realizadas.

Una vez conocidos los parámetros de soldadura óptimos, es necesario la generación de las trayectorias de fabricación de cada uno de los modelos que se desean fabricar, para ello se va a emplear el programa Mastercam® y posteriormente este programa se simula mediante el el programa comercial Robotmaster®, con el objeto de comprobar que no se producen colisiones o algún tipo de interferencia. Una vez que se ha comprobado que el programa, es correcto y no existen colisiones, se exportar mediante el postprocesador adecuado para el robots empleado, en este caso de la marca comercial yaskawa. Una vez que el programa ha sido generado este se carga mediante un conector externo o un pen drive, en la consola del robot y se ejecutan los programas.

Para la ejecución de esta tarea se ha utilizado un robot HP20D-6 de Yaskawa Motoman junto con una maquina GMAW, el modelo CMT advance de la marca comercial FRONIUS® y algunos equipos auxiliares necesarios como posicionadores y viradores.

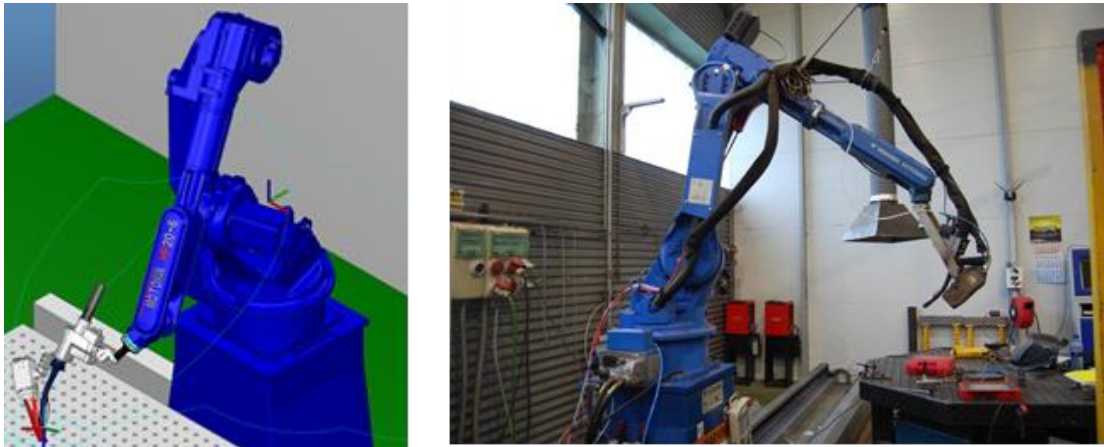


Figura 163. Izquierda: Imagen de la simulación del proceso con **Robomaster**<sup>®</sup>. Derecha: Pruebas realizadas en la planta piloto.

Una vez realizadas una serie de pruebas con estas geometrías y que se haya conseguido generar estructuras cilíndricas verticales con homogeneidad y rigidez suficiente, se procedió a la soldadura de los cupones a ensayar. En primer lugar se exponen los resultados obtenidos con la geometría de celda a 45° para la estructura de “árbol” (Figura 164).



Figura 164. Celda a 45° para la estructura de “árbol”

El siguiente modelo que se ha desarrollado es la de una geometría de celda a 60° para la estructura “biapoyada”. El proceso de fabricación ha sido similar al seguido con la geometría anterior, pero modificando las trayectorias para alcanzar la nueva disposición.

Con el objetivo de poder comparar resultados respecto a los esfuerzos mecánicos que soportan las estructuras con geometría tipo árbol, se han realizado tanto pruebas con un único componente, como con dos unidades, de forma que permita obtener conclusiones en relación a la resistencia que puede alcanzar cada celda tipo.



Figura 165. Pruebas realizadas con estructura biapoyada.

La tercera forma geométrica analizada está basada en paredes verticales conectadas entre ellas mediante filamentos individuales que permitan generar estructuras de mayor rigidez, de forma que se pueda estudiar el comportamiento de estas estructuras mediante su caracterización. Siguiendo la misma idea que con la geometría anterior se ha optado por generar varias tipologías de la misma estructura objetivo, para poder sacar conclusiones de cómo puede influir la altura de la pared y la disposición de las uniones en la resistencia de estas geometrías. En las siguientes figuras se detallan algunos de los pasos seguidos durante el proceso de fabricación: Figura 166, Figura 167, Figura 168 y Figura 169.



Figura 166. Pruebas realizadas con geometría estructural



Figura 167. Pruebas realizadas con geometría estructural



Figura 168. Pruebas realizadas con geometría estructural



Figura 169. Pruebas realizadas con geometría estructural

Como se ha expuesto anteriormente se han fabricado dos tipos de geometrías de pared vertical con diferentes alturas, las piezas obtenidas se detallan en las siguientes imágenes.

En primer lugar se ha generado una estructura simétrica con una altura de pared de 40 mm y con una separación entre ellas de 35 mm, la longitud objetivo para estas muestras es de 100 mm.



Figura 170. Pruebas realizadas con geometría estructural

En el caso de la segunda tipología estructural, se optado por emplear unas alturas de pared disimilares de modo que permita comparar como el número de elementos de unión del “panel de abeja” va a influir en la resistencia mecánica que proporcione el conjunto. Con respecto a las condiciones de fabricación de este segundo modelo estructural se han obtenido unos resultados muy positivos también, ya que se obtienen paredes verticales con una perpendicularidad adecuada para estos sistemas de fabricación avanzada.



Figura 171. Pruebas realizadas con geometría estructural

## Tarea 2. Caracterización mecánica avanzada. Ensayos de impacto

Para la realización de esta tarea ha llevado a cabo una evaluación de las propiedades mecánicas de las probetas detalladas en la tarea anterior. En principio se había planteado un ensayo de impacto, pero tras el análisis en profundidad de posibles aplicaciones y sus requerimientos, se ha optado por la realización de ensayos de compresión. Dichos ensayos permiten analizar la dinámica de comportamiento paso a paso.

La probeta se somete a un ensayo de compresión, el cual se realiza para determinar las propiedades de un material frente a una sollicitación axial negativa. En primer lugar se ensayó la muestra con la geometría “árbol”, cuya referencia es el PROBETA-5 (Figura 173 y Figura 174), con el objetivo de obtener valores de referencia para un ensayo individual de la sección que constituye la celda fundamental de las estructuras lattices más complejas.

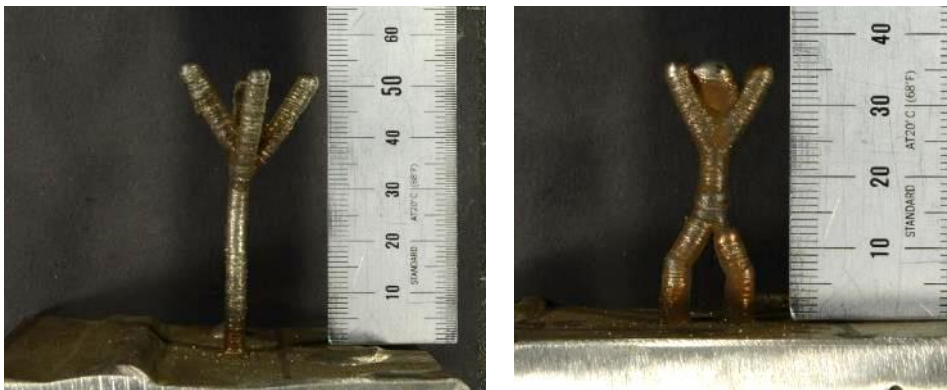


Figura 172. Celdas tipo lattice antes del ensayo



Figura 173. Disposición ensayo de la probeta 5



Figura 174. Probeta 5 ensayada

A continuación se ensayó el segundo modelo con geometría “biapoyada” con la referencia PROBETA-2 (Figura 175 y Figura 176).



Figura 175. Disposición ensayo PROBETA-2



Figura 176. Pieza ensayada PROBETA-2

A continuación se muestran los resultados obtenidos para estos dos ensayos en los que se pueden observar los valores máximos de carga, así como la evolución geométrica (compresión) que sufren los componentes ensayados en unidades del Sistema Internacional.

	Máximo Carga de compresión (kN)	Esfuerzo de compresión Máximo Carga de compresión (MPa)	Extensión Máximo Carga de compresión (mm)
PROBETA 2	6.51	42.31	-3.09
PROBETA 5	70.68	459.18	-48.44
Media	38.60	250.74	-25.77
Desviación estándar	45.37667	294.77227	32.07068
Mínimo	6.51	42.31	-48.44
Máximo	70.68	459.18	-3.09
Escala	64.17	416.87	45.35

Figura 177. Resultados obtenidos en los ensayos de compresión

A continuación se muestra el gráfico relativo al ensayo de la muestra con geometría de “humano” con la referencia PROBETA-2.

Graph 1

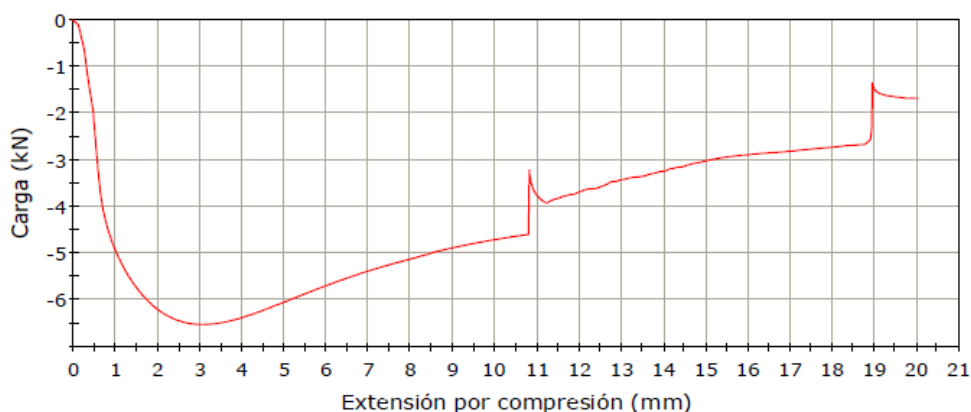


Figura 178. Gráfica ensayo de compresión modelo lattices geometría tipo “biapoyada”.

Se puede observar que se produce un incremento lineal en la carga que soporta la probeta hasta alcanzar un valor máximo de 6,5 kN junto con una extensión de aproximadamente 3 mm. En este momento en este momento se produce una disminución de carga con una pendiente lineal que se corresponde con el proceso de flexión de la zona central de la probeta, columna central. A la mitad del ensayo se observa una variación significativa en el gráfico carga-extensión, debido a la rotura de uno de los soportes superiores o brazos que componen la probeta. El ensayo se detiene finalmente tras una deformación final de la columna central de 4mm, a partir de la cual, no se obtienen datos significativos que aporten relevancia al ensayo. En la probeta no se llega a la rotura de la misma ya que continúa deformándose de manera prolongada y se da por finalizado el ensayo.

Del ensayo se concluye que la resistencia a compresión de la celda “biapoyada” es de 6,5kN aproximadamente, lo que equivale a 650kg.

A continuación se muestra el gráfico relativo al ensayo de la muestra con geometría de “árbol” con la referencia PROBETA-5.

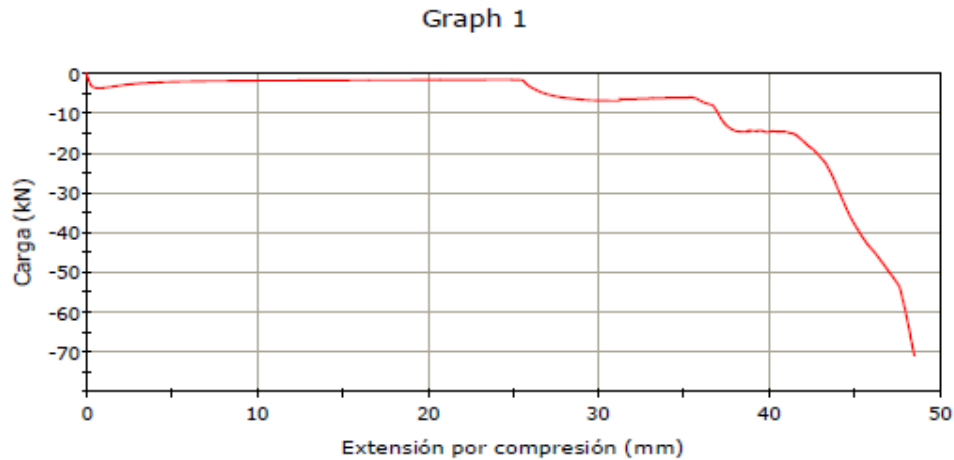


Figura 179. Gráfica ensayo de compresión modelo lattice geometría tipo “árbol”

En la gráfica de la Figura 179 se puede observar cómo inicialmente se produce una compresión del componente en la zona el tronco, que presenta una esbeltez superior al resto de la probeta, por lo cual es la primera que sufre una deformación significativa, de una magnitud de aproximadamente 25 mm. A partir de este punto, la celda comienza a ofrecer una gran resistencia a la compresión con la zona de las cuatro ramificaciones de la probeta. Una vez que las cuatro ramificaciones se encuentran al mismo nivel formando una plano continuo, se consigue un aumento significativo de carga de compresión, este aumento se traduce en una pendiente constante de la carga de compresión hasta que se alcanza un valor de 70 kN. Finalmente, tras alcanzar este valor de carga, se produce la rotura de la probeta y se separan las dos partes que conforman el soporte inferior y el superior.

Del ensayo se concluye que **la resistencia a compresión de la celda tipo “árbol” es de 71kN** aproximadamente, lo que equivale a 7.100kg, es decir **7,5 Toneladas**.

A continuación, se **ensayaron las geometrías estructurales más complejas** formadas por las paredes laterales conectadas mediante nervios individuales. Para el ensayo de este tipo de estructuras se dispone de tres probetas diferentes, en las cuales se ha optado por realizar cambios de geometría con diferentes alturas, diferentes números de conectores entre paredes y variaciones de sección, con el objetivo de comprobar cómo influye la disposición del material respecto a la carga que soporta y las soluciones constructivas que pueden proporcionar estos materiales. Estas estructuras se someten a un ensayo de flexión, en el cual la probeta, a medida que se le aplica la carga, va sufriendo una deformación que genera una curvatura; en la zona superior tiende a estirarse (el empujador actúa desde arriba, véase Figura 181, mientras que en la inferior tiende a contraerse. Esto se traduce en que las fibras de material están sometidas a esfuerzos de tracción en la parte inferior, y a esfuerzos de compresión, en la parte superior.

En primer lugar se ensayó la muestra con la geometría de pared a diferente altura y una conexión entre paredes formada por una línea de nervios individuales, cuya referencia es el PROBETA-7, con el objetivo de obtener valores de la sección y cómo afecta la disposición y altura de las paredes a la carga de flexión.

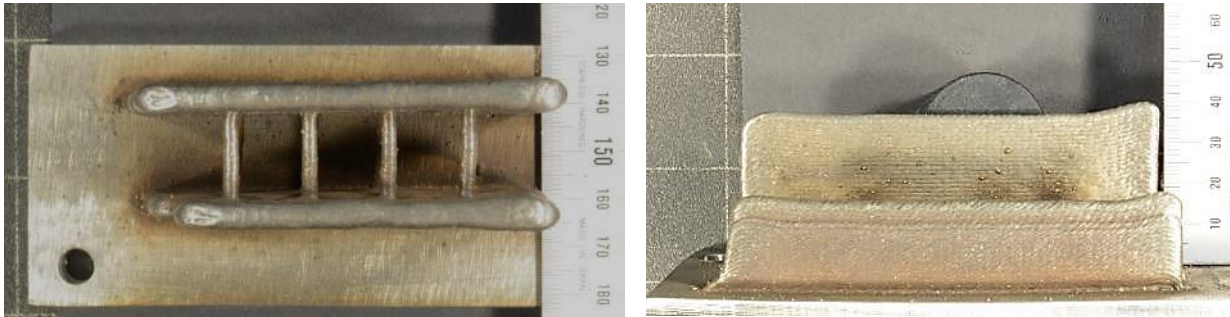


Figura 180. Probeta PROBETA-7 paredes laterales desiguales

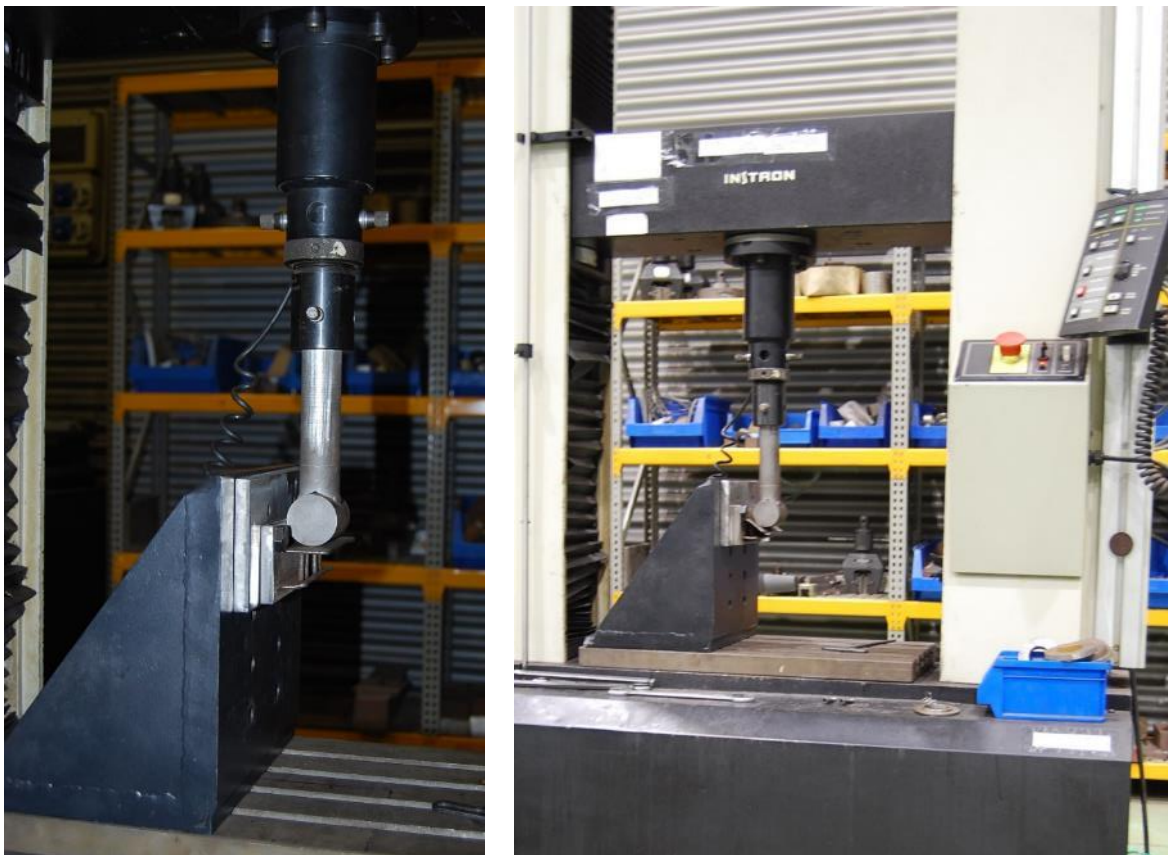


Figura 181. Ensayo PROBETA-7 paredes laterales desiguales

En este caso se está ante un caso de flexión en voladizo y por tanto se tienen esfuerzos de flexión y de cortadura. El punto de actuación de la carga está a unos 25 mm de la base de la probeta.

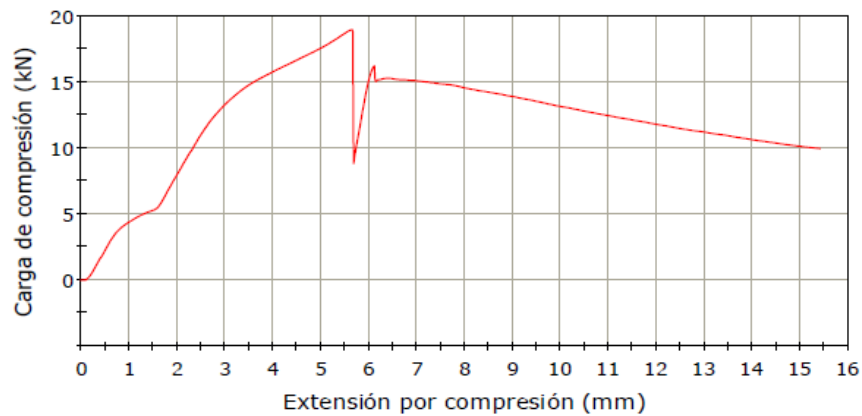


Figura 182. Gráfico PROBETA-7 paredes laterales desiguales

A la vista de los resultados (Figura 182), se ha obtenido un valor de carga de aproximadamente 19 kN, para un valor de flecha en la zona de máxima carga de unos 6 mm, una vez se alcanza el valor máximo de carga, se produce una disminución de la carga de compresión lineal hasta que finaliza el ensayo.

En segundo lugar se ensayó la muestra con la geometría de pared a misma altura y una conexión entre paredes formada por una línea de tres nervios individuales, cuya referencia es el PROBETA-8, con el objetivo de obtener valores de la sección y cómo afecta la disposición y altura de las paredes a la carga de flexión.

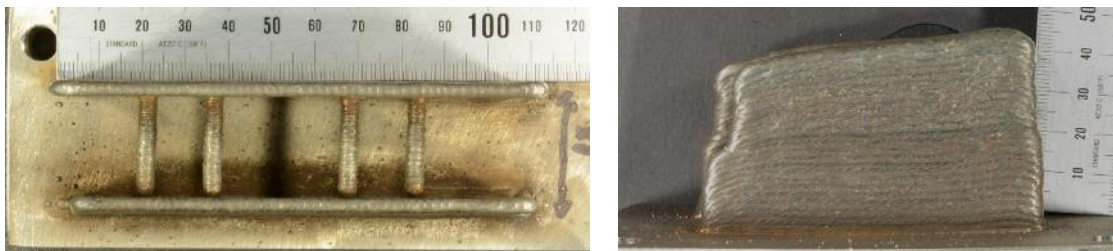


Figura 183. Probeta PROBETA-8 paredes laterales iguales 4 nervios



Figura 184. Ensayo PROBETA-8 paredes laterales iguales 4 nervios

Al igual que en el caso anterior, se está ante un caso de flexión en voladizo, por lo tanto se tienen esfuerzos de flexión y de cortadura, en el cual el punto de actuación de la carga está a unos 25 mm de la base de la probeta.

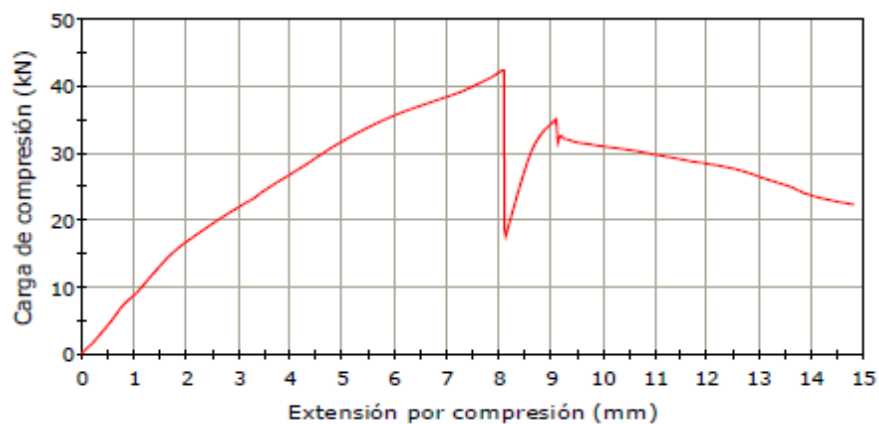


Figura 185. Gráfico PROBETA-8 paredes laterales iguales 3 nervios

Para esta probeta, se ha obtenido un valor de carga de carga de aproximadamente 42 kN, para un valor de flecha en la zona de máxima carga de unos 8 mm, una vez que se alcanza el valor máximo de carga, se produce una disminución de la carga de compresión lineal hasta que finaliza el ensayo.

En tercer lugar se ensayó la muestra con la geometría de pared a misma altura y una conexión entre paredes formada por una línea de tres nervios individuales, cuya referencia es el PROBETA-8, con el objetivo de obtener valores de la sección y cómo afecta la disposición y altura de las paredes a la carga de flexión.



Figura 186. Probeta PROBETA-6 paredes laterales iguales cortos



Figura 187. Ensayo PROBETA-6 paredes laterales iguales cortos

Al igual que en el caso anterior, se está ante un caso de flexión en voladizo, por lo tanto se tienen esfuerzos de flexión y de cortadura, en el cual el punto de actuación de la carga está a unos 30 mm de la base de la probeta.

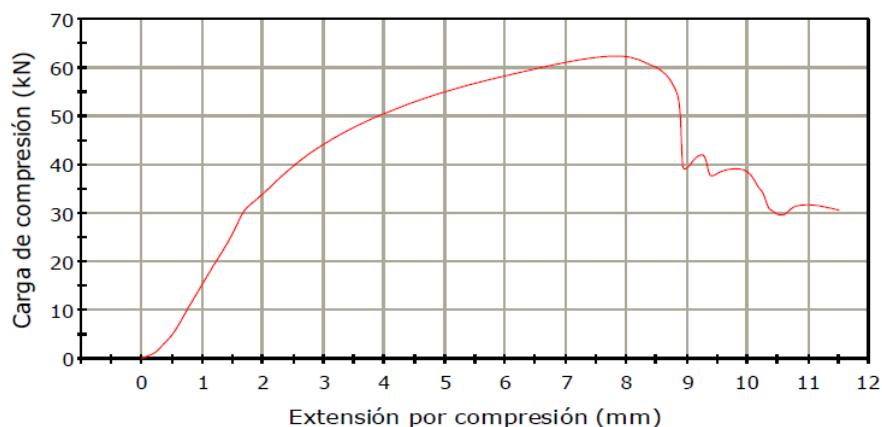


Figura 188. Gráfico PROBETA-6 paredes laterales iguales 8 nervios

Para esta probeta, se ha obtenido un valor de carga de carga de aproximadamente 62 kN, para un valor de flecha en la zona de máxima carga de unos 8 mm, una vez que se alcanza el valor máximo de carga, se produce una disminución de la carga de compresión lineal hasta que finaliza el ensayo.

	Mínimo Carga (kN)	Carga de compresión Carga (N)	Extensión Mínimo Carga (mm)
PROBETA 7	-18,93002	18930,02	-5,65
PROBETA 8	-42,42496	42424,96	-8,07
PROBETA 6	-62,36773	62367,73	-7,80

Figura 189. Gráfico resumen ensayo tres probetas pared lateral

### Ensayo de durezas

Adicionalmente, se realizó un ensayo de durezas HV10 sobre uno de los modelos de “biapoyada” que no se han ensayado, para determinar la resistencia que ofrece un material a ser rayado o penetrado por una pieza de otro material distinto. La dureza depende de la elasticidad del material y de su estructura cristalina, características que nos han proporcionado mucha información de cómo se va a comportar el material y si se alcanzan unos valores adecuados a las sollicitaciones teóricas del material. Las pruebas de dureza de los metales y del resto de los materiales aportan información fundamental sobre propiedades como la fuerza, la ductilidad o la resistencia frente a las deformaciones plásticas y elásticas.

A continuación, se muestra una macrografía del modelo sobre el cual se ha realizado el ensayo de durezas.



Figura 190. Macrografía modelo sometido a ensayo de durezas

Se han realizado líneas de durezas en diferentes zonas del modelo, para poder comprobar las propiedades del material en diferentes zonas y poder contrastar que las propiedades se mantienen constantes a lo largo del componente. Las zonas que se han analizado son las siguientes tal y como se aprecia en la imagen adjunta:

- Extremidades superiores (Izquierda y derecha)
- Extremidades inferiores (Izquierda y derecha)
- Tronco



Figura 191. Macrografía modelo sometido a ensayo de durezas

Los resultados obtenidos se detallan en las gráficas adjuntas:

Tabla 1 Durezas extremidad inferior izquierda

Extremidad inferior izquierda		
1	0,338	162
2	0,33	170
3	0,334	166
4	0,323	178
5	0,29	221

Tabla 2 Durezas extremidad inferior derecha

Extremidad inferior derecha		
1	0,322	179
2	0,315	187
3	0,337	163
4	0,324	176
5	0,322	179

Tabla 3 Durezas extremidad superior izquierda

Extremidad superior izquierda		
1	0,332	168
2	0,326	174
3	0,331	169
4	0,335	165
5	0,33	171

Tabla 4 Durezas extremidad superior derecha

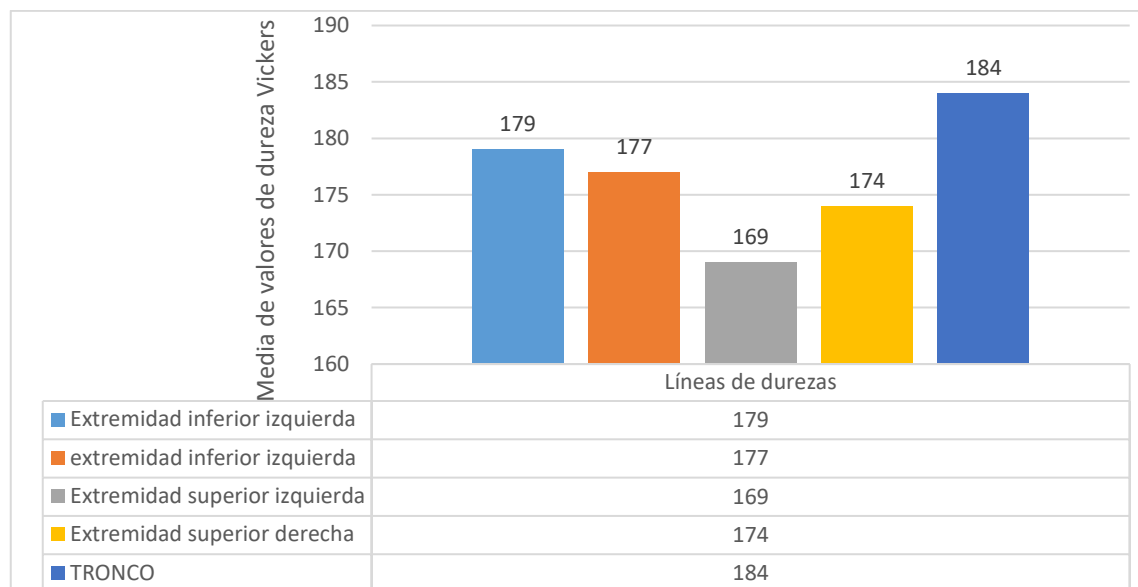
Extremidad superior derecha		
1	0,326	175
2	0,326	175
3	0,324	177
4	0,321	180
5	0,335	165

Tabla 5 Durezas zona central

TRONCO		
1	0,332	168
2	0,327	174
3	0,327	173
4	0,306	198
5	0,305	199

6	0,319	182
7	0,318	184
8	0,32	181
9	0,323	178
10	0,319	183
11	0,321	180
12	0,323	177
13	0,311	192
14	0,312	190
15	0,308	195

Tabla 6 Resultados Vickers obtenidos (HV10 media obtenida de la línea de durezas)



De los resultados mostrados en la Tabla 6 se observa que los valores de dureza media obtenidos son muy similares, con una desviación de aproximadamente 20 unidades vickers, lo que nos indica, la homogeneidad que existe a lo largo de todo el elemento ensayado.

## **HITO 6. DISEÑO DE PROCEDIMIENTO DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y CERTIFICACIÓN DEL PRODUCTO FABRICADO MEDIANTE WAAM DE ACUERDO CON LA NORMA APLICABLE (UNE EN ISO 17296-3)**

En esta parte del proyecto se ha realizado un análisis de la normativa vigente en materia de fabricación mediante WAAM objeto del análisis.

La fabricación aditiva crece a un ritmo rápido a nivel global, pero todavía no existe una manera estandarizada de demostrar a los fabricantes que los productos sean seguros.

Las técnicas de Fabricación aditiva proporcionan a las empresas flexibilidad para diseñar productos innovadores y/o reducir plazos de producción, pero existen importantes barreras que superar para garantizar la calidad y la seguridad en la vida útil de las piezas fabricadas mediante este tipo de proceso.

### **Tarea 1. Diseño de procedimiento de caracterización mecánica**

La fabricación aditiva crece a un ritmo rápido a nivel global, pero todavía no existe una manera estandarizada de demostrar a los fabricantes que los productos sean seguros.

Las técnicas de Fabricación aditiva proporcionan a las empresas flexibilidad para diseñar productos innovadores y/o reducir plazos de producción, pero existen importantes barreras que superar para garantizar la calidad y la seguridad en la vida útil de las piezas fabricadas mediante este tipo de proceso.

Esta tarea surge por el motivo previamente explicado, en el que se pretende realizar un procedimiento adecuado para realizar una certificación de piezas, necesaria para los fabricantes que permita asegurar la calidad y la seguridad de las piezas fabricadas.

La mayoría de las certificaciones para Fabricación Aditiva se habían centrado en procesos y sistemas basados en polvo. Sin embargo, estos procesos basados en polvo suelen estar limitados por el tamaño de los componentes que pueden producirse y los materiales disponibles.

Esto implica, que se hayan encontrado limitaciones de la integración de los sistemas de fabricación aditiva en industrias que requieren producir componentes de mayor tamaño.

La utilización de materia prima de alambre permite a las empresas producir componentes de mayor tamaño con una mayor selección de materiales. Se va a analizar estudios mediante Euronorma y mediante ASTM.

### **Según Eurnorma**

La norma ISO 17296: "Fabricación Aditiva", en concreto la parte 3: "características principales y métodos de ensayo correspondientes" que engloba los principales requisitos aplicados a los ensayos de piezas mediante proceso de fabricación aditiva y tiene como objeto ofrecer recomendaciones y asesoramiento respecto a los métodos de ensayo para el proceso de desarrollo o producción de piezas.

La tecnología WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) utiliza un hilo de material metálico y soldadura por arco. Este proceso se basa en un cabezal de soldadura que funde la punta de hilo metálico y lo va depositando en una base o sustrato. A medida que se va enfriando, se superpone una nueva capa de metal fundido sobre la anterior y así sucesivamente hasta completar la pieza.

En esta norma los ensayos que aplican, van en función del nivel de restricción de las piezas; piezas de altas prestaciones, piezas funcionales y prototipos. En este proyecto las piezas que se van a realizar son prototipos. Los ensayos que a continuación se citan son los que deben cumplirse de acuerdo con la norma en función de los requisitos geométricos y mecánicos.

1. Requisitos geométricos:

- Tamaño, longitud y dimensiones de los ángulos, tolerancias dimensionales.
- Tolerancias geométricas (desviación de forma y de posición)

2. Requisitos mecánicos:

- Durezas
- Resistencia a la tracción
- Resistencia al impacto, aunque no es uno de los ensayos que debe cumplirse según la norma, es un ensayo recomendable para evaluar la tenacidad del material o resistencia de un material a una rotura frágil.
- Ensayo macrográfico, en la norma no viene reflejado, pero esta novedosa técnica, está basada en la deposición capa a capa de cordones soldados, de la cual nos permite conocer las posibles imperfecciones, como faltas de fusión con el sustrato o entre capas, porosidad, fisuras u otros posibles defectos que pudiésemos encontrar.

Adicionalmente a las recomendaciones de la norma, se han realizado ensayos no destructivos.

- Inspección visual
- Radiografías
- Líquidos penetrantes

En la

**Tabla 7**, se hace una lista de las principales características de calidad requeridas para las piezas fabricadas mediante fabricación aditiva.

**Tabla 7. Normas de aplicación para la fabricación de prototipos mediante soldadura WAAM.**

Características de calidad	Ensayo	Norma de aplicación
<b>Ensayos no destructivos</b>	Inspección visual	EN ISO 17637
	Examen Radiográfico	ISO 5579
	Ensayo de penetración (Líquidos penetrantes)	ISO 3452-1
<b>Requisitos geométricos</b>	Tamaño, longitud y dimensiones de los ángulos, tolerancias dimensionales	ISO 129-1 ISO 286-1 ISO 14405-1 (especificación) ISO 1938-1 ISO 2768-1
	Tolerancias geométricas (desviaciones de forma y posición)	ISO 1101 ISO 2768-2
<b>Requisitos mecánicos</b>	Macrográfico	ISO 17639
	Dureza	ISO 6507
	Resistencia a la tracción	ISO 6892
	Resistencia al impacto	ISO 148-1

Durante la ejecución de los prototipos es importante registrar datos como la temperatura, las velocidades, los parámetros eléctricos del proceso y otros datos de interés. Para ello, es necesario que en la ejecución de los diseños de piezas o prototipos la supervisión del proceso por un IWE (International Welding Engineer).

### Según normativa ASTM

La F3122-14 Guía estándar para la evaluación de las propiedades mecánicas de materiales metálicos fabricados mediante procesos de fabricación de aditivos

#### 1. Ámbito de aplicación

- 1.1. Esta norma sirve de guía para las normas existentes o las variaciones de las normas existentes que puedan ser aplicables para determinar las propiedades mecánicas específicas de los materiales fabricados con un proceso de fabricación aditivo.
- 1.2. Como se indica en muchas de estas normas referenciadas, existen varios factores que pueden influir en las propiedades notificadas, incluyendo el material, la anisotropía del material, el método de preparación del material, la porosidad, el método de preparación de la muestra, el entorno de ensayo, la alineación y la sujeción de la muestra, la velocidad de ensayo y la temperatura de ensayo. Estos factores deben registrarse, en la medida en que se conozcan, de acuerdo con la Práctica F2971 y las directrices de las normas de referencia.
- 1.3. Las siguientes normas no se mencionan directamente en la guía, pero también contienen información que puede ser útil en los ensayos de probetas metálicas realizadas mediante la fabricación de aditivos: A370, A1058, B211, B348, B557, B565, B724, B769, E3, E6, E7, E290, E467, E468, E837, E915, E1049, E1823, E1942.  
Unidades - Los valores indicados en unidades SI deben considerarse como la norma. No se incluyen otras unidades de medida en esta norma.

Esta norma no pretende abordar todos los problemas de seguridad, si los hubiere, asociados con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma establecer prácticas apropiadas de seguridad y salud y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias antes de su uso.

## 2. Documentos de referencia

### Normas ASTM

- A370 Métodos de ensayo y definiciones para el ensayo mecánico de productos de acero
- A1058 Métodos de prueba para pruebas mecánicas de productos de acero - Métrico
- B211 Especificación para barras, varillas y alambres de aluminio y aleaciones de aluminio laminados o acabados en frío
- B348 Especificación para barras y palanquillas de titanio y aleaciones de titanio
- B557 Métodos de ensayo para ensayos de tracción de productos forjados y de fundición de aluminio y aleaciones de magnesio
- B565 Método de prueba para el ensayo de cizallamiento de remaches de aluminio y de aleaciones de aluminio y alambres y varillas de cabeza fría
- B645 Práctica de ensayo de resistencia a la fractura por deformación plana lineal-elástica de aleaciones de aluminio
- B646 Práctica para el ensayo de resistencia a la fractura de aleaciones de aluminio
- B647 Método de prueba para determinar la dureza por indentación de las aleaciones de aluminio por medio de un medidor de dureza Webster
- B648 Método de prueba para determinar la dureza por indentación de las aleaciones de aluminio por medio de un Impresor Barcol
- B724 Método de prueba para determinar la dureza por indentación de las aleaciones de aluminio por medio de un instrumento de tipo Newage, portátil y sin calibre
- B769 Método de prueba para el ensayo de cizallamiento de aleaciones de aluminio
- B909 Guía para la prueba de resistencia a la fractura por deformación plana de productos de aluminio no sometidos a tensión
- Guía E3 para la preparación de muestras metalográficas
- E6 Terminología relativa a los métodos de ensayo mecánico
- E7 Terminología relacionada con la metalografía
- Métodos de ensayo E8/E8M para ensayos de tracción de materiales metálicos
- E9 Métodos de ensayo de compresión de materiales metálicos a temperatura ambiente
- Método de prueba E10 para determinar la dureza Brinell de materiales metálicos
- Métodos de prueba E18 para determinar la dureza Rockwell de materiales metálicos
- Métodos de ensayo E21 para ensayos de tracción a temperatura elevada de materiales metálicos
- Métodos de ensayo E23 para ensayos de impacto de barra dentada en materiales metálicos
- E111 Método de prueba para Módulo de Jóvenes, Módulo de Tangente y Módulo de Acordeón
- E132 Método de prueba para la relación de Poissons a temperatura ambiente
- Tablas de conversión de dureza E140 para metales Relación entre dureza Brinell, dureza Vickers, dureza Rockwell, dureza superficial, dureza Knoop, dureza escleroscópica y dureza Leeb
- E143 Método de prueba para módulo de cizallamiento a temperatura ambiente

- E209 Práctica para ensayos de compresión de materiales metálicos a temperaturas elevadas con velocidades de calentamiento convencional o rápido y velocidades de deformación
- Método de prueba E238 para la prueba de cojinetes de tipo pasador de materiales metálicos
- Métodos de ensayo E290 para ensayos de flexión de materiales en busca de ductilidad
- Métodos de prueba E292 para realizar ensayos de tensión de materiales con muesca de tiempo de ruptura
- Método de prueba E384 para determinar la dureza de los materiales Knoop y Vickers
- Método de ensayo E399 para determinar la tenacidad a la fractura por deformación plana lineal-elástica  $K_{Ic}$  de materiales metálicos
- E448 Práctica para la prueba de dureza con escleroscopio de materiales metálicos
- E466 Práctica para realizar ensayos de fatiga axial de amplitud constante controlada por fuerza de materiales metálicos
- E467 Práctica para la verificación de las fuerzas dinámicas de amplitud constante en un sistema de ensayos de fatiga axial
- E468 Práctica para la presentación de los resultados de la prueba de fatiga de amplitud constante para materiales metálicos
- Método de ensayo E606 para ensayos de fatiga controlados por deformación
- E647 Método de prueba para la medición de las tasas de crecimiento de grietas por fatiga
- Práctica de ensayo de fractura con probetas de tensión de superficie de fisura E740
- E837 Método de prueba para determinar las tensiones residuales por el método de galgas extensométricas de perforación de agujeros
- E915 Método de prueba para verificar la alineación de los instrumentos de difracción de rayos X para R

## **Tarea 2. Certificación del producto fabricado mediante WAAM de acuerdo con la norma**

Una vez definidos los ensayos que permiten caracterizar las piezas fabricadas por WAAM, se realizaron ensayos sobre las paredes recrecidas realizadas en la anualidad de 2019 en las Tareas 1.1, 1.3 y 2.2.

La metodología seguida para la caracterización de las propiedades ha sido la misma que en la anualidad anterior (según Euronorma). Los resultados obtenidos se muestran en los respectivos apartados.

La norma UNE-EN ISO 17296:3 (Fabricación aditiva. Principios generales. Parte 3: Propiedades y procedimientos de ensayo) define qué tipo de ensayos se han de llevar a cabo en función de la categoría de la pieza; es decir, de su responsabilidad. Así, en el caso de una pieza de baja responsabilidad sería suficiente la determinación de su densidad, geometría y propiedades básicas como la dureza y la resistencia a la tracción. Sin embargo, en el caso de una pieza de elevada responsabilidad es necesario llevar a cabo numerosos ensayos adicionales como la tenacidad al impacto, la resistencia a la fatiga, al desgaste, al crecimiento de grieta por fatiga, la tenacidad a la fractura, determinación del nivel de tensiones residuales, etc.

El procedimiento de homologación consistirá en llevar a cabo una caracterización básica de los demostradores que consistirá en la medición la geometría (distorsiones), el análisis de la microestructura, la determinación de la dureza y de las propiedades mecánicas básicas.

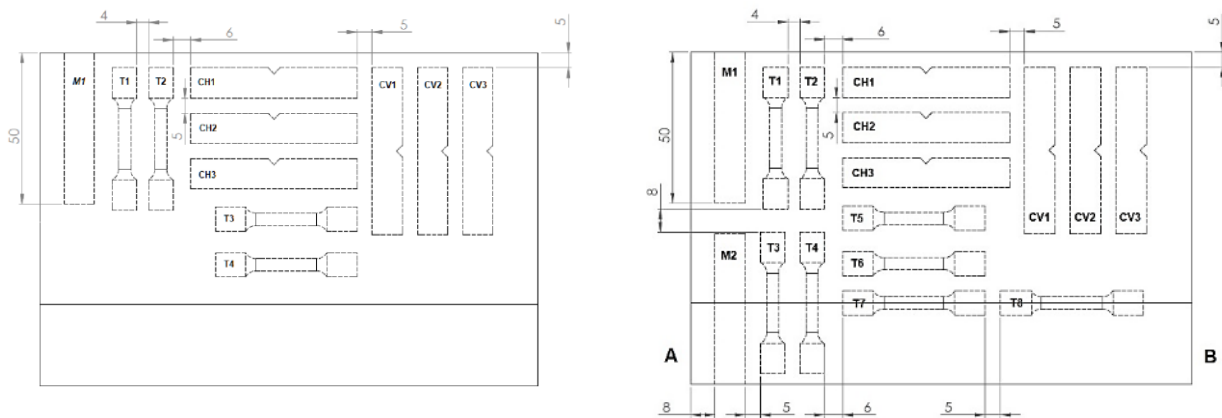
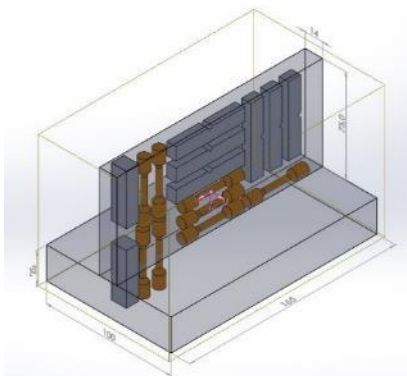


Figura 192. Plano de extracción de piezas. Izqd.: cuando la chapa base no forma parte de la pieza. Dcha.: Cuando la chapa base forma parte de la pieza y la interfase es una zona crítica



CERTIFICACIÓN (ENSAYOS DESTRUCTIVOS)				
Ensayo	NOMENCLATURA	NUMERO PROBETAS	ESPECIFICACION ENSAYOS	COMENTARIOS
TRACCION	L	6	UNE-EN ISO 6892-1	Probetas cilíndricas Ø5mm, L0=25mm, Lc=28mm, Rprox.=5mm con extensómetro para determinar límite elástico. 3 probetas horizontales y 3 probetas verticales
IMPACTO	SH	6	UNE-EN ISO 148-1:	Probetas de 7.5x10x55 mm 3 con entalla vertical y 3 con entalla horizontal
MACROGRAFIA (tamaño y geometría del grano)	Ma	2	UNE-EN ISO 17639	Con fotografía
MICROGRAFIA (microestructura)	Mi	2	UNE-EN ISO 17639	Embutición de probeta metalográfica en baquelita de ø50mm Fotos a 200 aumentos en los tres planos con foto
DUREZAS	HV1	2	UNE-EN ISO 9015-2	2 líneas de dureza HV1 en cada línea se realizarán 10 huellas.

Figura 193. Especificación de ensayos de caracterización según euronorma



Figura 194. Resultados obtenidos en el ensayo macrográfico realizado en las probetas extraídas de la pared de Inconel 625

HARDNESS TEST. METALLIC MATERIALS																			GL0284-0
Test date:	Standard: <b>UNE-EN-ISO 6507-1:2006</b>																		
Type:	VICKERS							Load	1 kg			---			---				
Point:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Line 1	194	183	190	189	205	208	221	217	236	229	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Line 2	213	214	204	196	212	208	200	223	210	205	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Line 3	174	222	214	214	211	107	171	215	203	214	---	---	---	---	---	---	---	---	---

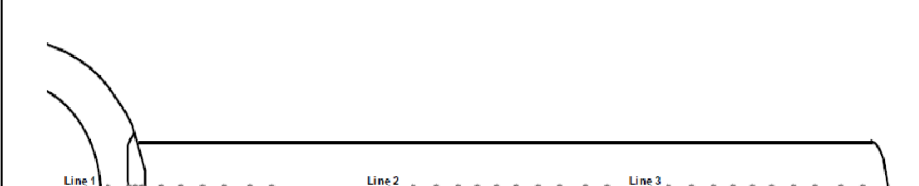
  


Figura 195. Resultados obtenidos en la medición de durezas realizada en las probetas extraídas de la pared de Inconel 625

TENSILE AND BEND TEST. METALLIC MATERIALS								GL0251.2
Test date:		Standard: <b>UNE-EN ISO 6892-1:2017 A4</b>						
TENSILE TEST	Specimen	Vertical	Horizontal	---	---	---	---	
Thickness (mm)		---	---	---	---	---	---	
Width or outer diameter (mm)		Ø5.03	Ø5.02	---	---	---	---	
Cross section (mm <sup>2</sup> )		19.87	19.79	---	---	---	---	
Young's Modulus (MPa)		---	---	---	---	---	---	
Parallel length Lc (mm)		28	28					
Yield Stress (MPa)	Upper R <sub>EH</sub>	---	---	---	---	---	---	
	Conventional R <sub>0.2</sub>	346	390	---	---	---	---	
Tensile strength	(kN)	12.87	13.76	---	---	---	---	
	(MPa)	648	695	---	---	---	---	
Initial length L <sub>0</sub> (mm)		25.0	25.0	---	---	---	---	
Elongation (%)		A <sub>25.0 mm</sub> =55.0	A <sub>25.0 mm</sub> =49.0	---	---	---	---	
Cross sectional area reduction (%)		58.0	53.5	---	---	---	---	
Break zone		---	---	---	---	---	---	

Figura 196. Resultados obtenidos en los ensayos de tracción realizados en las probetas extraídas de la pared de Inconel 625

(*)IMPACT TOUGHNESS TEST. METALLIC MATERIALS																GL0250.2
Test date:		Standard: <b>UNE-EN ISO 148-1:2017</b>														
Sample	PV1706081-41				PV1706081-41				---				---			
Cross section (mm2)	10 x 10				10 x 10				---				---			
Notch type	KV <sub>2</sub>				KV <sub>2</sub>				---				---			
Test temperature (°C)	-196				-196				---				---			
Specimen location	Vertical				Horizontal				---				---			
Notch location	Weld Metal				Weld Metal				---				---			
Specimen	1	2	3	Mean	1	2	3	Mean	1	2	3	Mean	1	2	3	Mean
Energy (J)	218	205	226	216	171	177	171	173	---	---	---	---	---	---	---	---
Ductile fracture (%)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Lateral expansion (mm)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Figura 197. Resultados obtenidos en los ensayos de impacto realizados en las probetas extraídas de la pared de Inconel 625

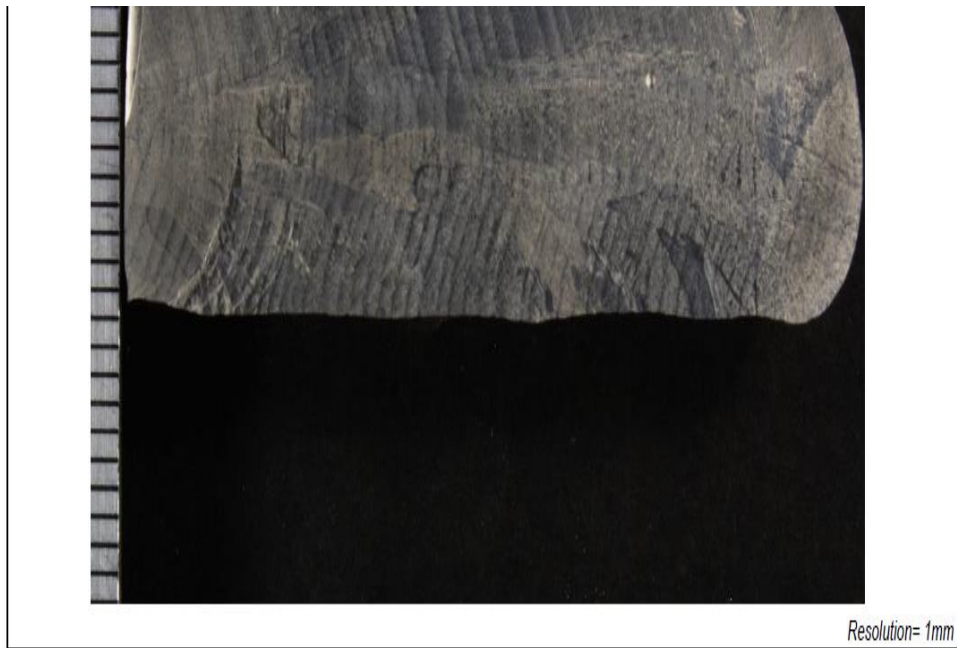


Figura 198. Resultados obtenidos en el ensayo macrográfico de la pared de titanio



Figura 199. Resultados obtenidos en los ensayos micrográficos realizados en la pared de titanio (3 micrografías unidas)

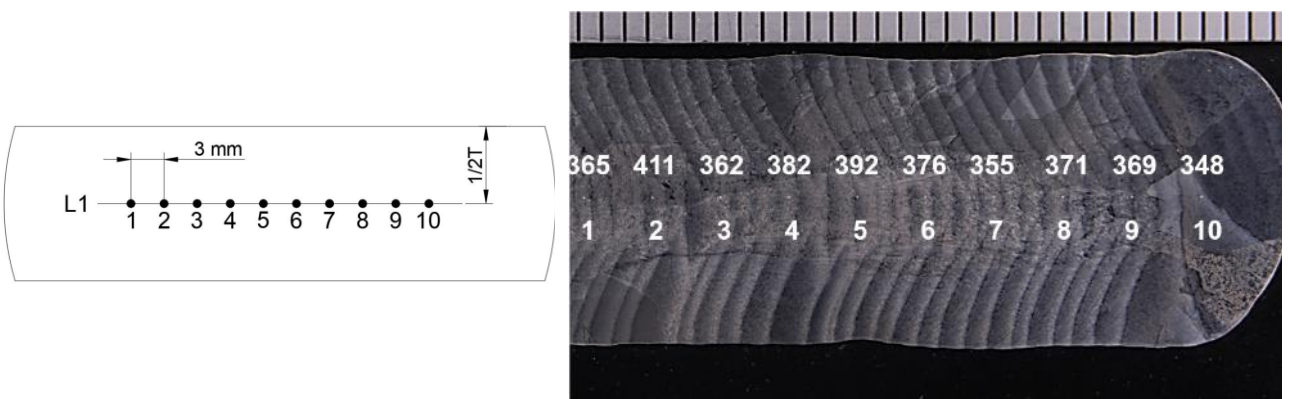


Figura 200. Resultados obtenidos en la medición de durezas rezada en la pared de titanio

TENSILE AND BEND TEST. METALLIC MATERIALS							GL0251-2
Test date:		19/03/2020		Standard:		UNE-EN ISO 6892-1:2017 A4	
<b>TENSILE TEST</b>	Specimen	T1	T2	T3	T4	---	---
Thickness (mm)		---	---	---	---	---	---
Width or outer diameter (mm)		Ø4.93	Ø4.98	Ø4.94	Ø4.94	---	---
Cross section (mm <sup>2</sup> )		19.09	19.48	19.17	19.17	---	---
Modulus of elasticity (GPa)		---	---	---	---	---	---
Reduced parallel section A (mm)		28	28	28	28	---	---
Upper yield strength UYS (MPa)		---	---	---	---	---	---
Conventional yield strength YS <sub>0.2</sub> (MPa)		983	948	950	963	---	---
Tensile strength S <sub>u</sub>	(kN)	20.27	20.48	20.06	20.50	---	---
	(MPa)	1062	1051	1030	1070	---	---
Initial length L <sub>0</sub> (mm)		25.0	25.0	25.0	25.0	---	---
Elongation after fracture (%)		A <sub>25.0 mm</sub> =8.5	A <sub>25.0 mm</sub> =7.0	A <sub>25.0 mm</sub> =4.5	A <sub>25.0 mm</sub> =3.0	---	---
Cross sectional area reduction (%)		27.0	29.5	24.0	24.5	---	---
Break zone		---	---	---	---	---	---

Figura 201. Resultados obtenidos en los ensayos de tracción realizados en la probetas extraídas de la pared de titanio

IMPACT TOUGHNESS TEST. METALLIC MATERIALS													GL0250-2			
Test date:		19/03/2020		Standard:		UNE-EN ISO 148-1:2017		Percutor radius:		2 mm						
Sample	PV2001451/1 (TiAl6V4)			PV2001451/1 (TiAl6V4)			---			---						
Dimensions (B x W x L) mm	10 x 10 x 55			10 x 10 x 55			---			---						
Notch type	KV <sub>2</sub>			KV <sub>2</sub>			---			---						
Test temperature (°C)	+20			+20			---			---						
Specimen location	Horizontal			Vertical			---			---						
Notch location	---			---			---			---						
Specimen	CH1	CH2	CH3	Mean	CV1	CV2	CV3	Mean	1	2	3	Mean	1	2	3	Mean
Absorbed energy (J)	28	21	23	24	29	40	16	28	---	---	---	---	---	---	---	---
Shear fracture appearance (%)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Lateral expansion (mm)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Figura 202. Resultados obtenidos en los ensayos de impacto realizados en la probetas extraídas de la pared de titanio

Además, tomando como guía la norma UNE-EN ISO 17296:3 (Fabricación aditiva. Principios generales. Parte 3: Propiedades y procedimientos de ensayo) y las propiedades de diseño de la pieza, para la homologación de una pieza en concreto, se acordará qué ensayos se llevarán a cabo, con el fin de asegurar que la pieza se comporte de forma adecuada durante su vida en servicio. Se diseñarán los ensayos sobre pieza de acuerdo a los requisitos de diseño.

Las probetas para los diferentes ensayos se mecanizarán a partir de los demostradores y serán ensayadas de acuerdo a las normas de referencia en cada caso. Las dimensiones y geometría de las probetas se adaptarán en función de las recomendaciones de cada Norma y de la geometría de los demostradores.

En algunas ocasiones es posible el diseño y ejecución de ensayos complejos que permitan analizar el comportamiento de la pieza tomando en cuenta las principales sollicitaciones en servicio. Esto es posible cuando se conocen las condiciones de contorno de la pieza durante su uso. En función de la complejidad de las sollicitaciones reales, se analizará la viabilidad de someter a los demostradores a un ensayo que simule su comportamiento en servicio. Si esto fuese posible, se diseñarán y mecanizarán los dispositivos adecuados para someter la pieza a una combinación de cargas

mecánicas (estáticas o dinámicas) y térmicas, lo más parecida posible a la real. El objetivo del ensayo es analizar y predecir el comportamiento de la pieza en una condición simulada de servicio.

El último paso en el proceso de homologación será el diseño de un protocolo de control de calidad del proceso de fabricación.

Una vez que se hayan definido los parámetros de proceso que permitan la obtención de piezas que satisfagan los requisitos de diseño, es necesario establecer un control de calidad durante la fabricación de las piezas. Dicho protocolo describirá en detalle los procedimientos que se deben llevar a cabo con relación a la materia prima, la calidad metalúrgica del material WAAM y de la pieza.

En el caso de las piezas de titanio (tarea 2.2) el proceso de homologación, adicionalmente a la caracterización básica llevada a cabo en las probetas extraídas de la pared fabricada en la tarea 2.2, incluye una caracterización de dos de las propiedades más importantes (por ser las más críticas en lo que se refiere al comportamiento de componentes en este tipo de material): tenacidad a la fractura y resistencia a la fatiga.

Como ya se ha indicado, las probetas para los diferentes ensayos se mecanizarán a partir de los demostradores (ver Figura 2) y serán ensayadas de acuerdo a las normas de referencia. En el caso de normativa americana:

- Ensayo no destructivo de inspección visual (IV), líquidos penetrantes (LP) y volumétrico (RX) para la determinación de posibles defectos internos.
- Ensayo macrográfico según ASTM 340 incluyendo la zona más alta de la probeta (cresta).
- Ensayo de durezas. Se dividirá la probeta metalográfica en tres partes (lo más grandes posibles que quepan en baquelita de  $\varnothing 50\text{mm}$ ). Se realizarán 3 líneas de dureza HV1 y en cada línea se realizarán 10 huellas aprox.
- Ensayo de impacto según ASTM E 23 en dirección horizontal y vertical:
  - 3 probetas horizontales de 7.5x10x55mm.
  - 3 probetas verticales de 7.5x10x55mm.
- Ensayo de tracción vertical y horizontal (en metal depositado y en zona de transición con chapa laminada de Ti6Al4V) según ASTM E8M, con extensómetro para determinación completa de las propiedades a tracción (una probeta en cada dirección y zona):
  - $\varnothing=4\text{mm}$
  - $L_0=16\text{mm}$
  - $L_c=20\text{mm}$
  - $R_{\text{aprox.}}=4\text{mm}$
- Realización de 6 ensayos de fatiga en base a norma EN 6072. Se ensayaran dos niveles de carga de 80 MPa y 50 MPa, Frecuencia 50 Hz y  $R=0.1$ .
- Realización de 6 ensayos de cortadura (shear) en base a norma ASTM B831.

Entre los sectores más interesados por la tecnología WAAM para la fabricación de sus componentes destaca el sector aeroespacial por el alto valor añadido de sus piezas. Se trata de un sector con normativa propia, normalmente más restrictiva que la europea o americana.

En la presente tarea se ha analizado la certificación de una posible pieza de titanio para el sector aeroespacial según la norma AMS 4999 rev. A - Titanium Alloy Direct Deposited Products 6Al - 4V Annealed y la norma AWS A5.16 (ERTi-5) - Titanium and Titanium alloy welding electrodes and rods.

Adicionalmente a los ensayos especificados anteriormente se ha estimado oportuno incluir:

- Composición química. Análisis de la pieza final de acuerdo a
  - Carbono: ASTM E1941
  - Hidrógeno: ASTM E1447
  - Oxígeno y Nitrógeno: ASTM E1409

- Otros elementos: ASTM E2371
- Ensayos de cizalladura ASTM B769
- Microestructura (antes y después de los tratamientos térmicos finales)
- Tamaño de grano: Ensayo según ASTM E3, ataque según ASTM E407, tamaño  $\geq$  No 6 según ASTM E112)
- Tenacidad a la fractura (KIC) de acuerdo a ASTM E399
- Tensiones residuales antes y después del tratamiento de alivio de tensiones según ASTM E387 (agujero ciego)
- Densidad: ISO 3369
- Módulo elástico: ASTM E111.
- Compresión: ASTM E9
- Propagación de grietas: ASTM E647 (CTW50)
- Contaminación superficial: EN 2003-9
- Bearing stress: ASTM E238.

Tras la revisión de la normativa se ha detectado que es imprescindible la medición continua en línea del contenido de oxígeno durante la fabricación (<1200ppm)

Adicionalmente se indica la realización de tres tratamientos térmicos, uno de alivio de tensiones (entre capas, en el caso de producirse una parada en el proceso de fabricación y al final de la fabricación), otro de revenido y por último uno de envejecimiento, todos ellos en atmósfera protectora de Argón o de Helio (<1300ppm de oxígeno). Para ello ha sido necesaria la adaptación de uno de los hornos de los que Fundación Idonial dispone (Véase **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Para poder incluir la medición de oxígeno en línea y continua durante el proceso de fabricación así como realizar los tratamientos térmicos adicionales durante y tras la fabricación, ha sido necesario prorrogar hasta finales de año la tarea y la realización de cupones adicionales de titanio durante los meses de noviembre y diciembre.

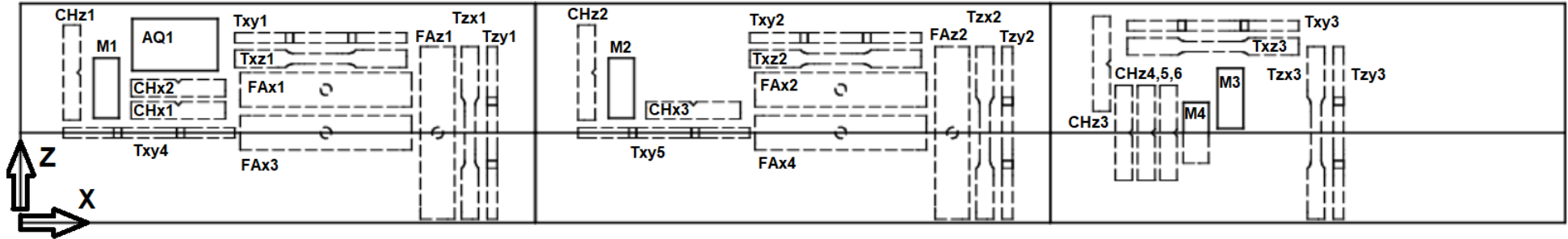


Figura 203. Propuesta de ensayos adicionales a extraer de la un demostrador

## 4 CONCLUSIONES

- Se ha conseguido construir un micro-laminador que ha permitido mejorar la calidad y las propiedades mecánicas de las probetas de acero inoxidable y de titanio. Está previsto seguir trabajando en mejoras del proceso de micro-laminación.
- Se han obtenido mejoras sustanciales del acabado superficial con uno de los procesos probados, GTAW sin material de aporte. Pero lamentablemente las deformaciones y el deterioro de propiedades mecánicas superficiales asociados no son admisibles.
- Los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre las celdas unitarias tipo lattice estudiadas han sido muy favorables. Está previsto contactar con empresas que puedan aprovecharse de dicho descubrimiento en alguno de sus productos. A pesar del elevado coste de la fuente de soldadura necesaria, se cree que puede resultar una ventaja competitiva para varias empresas de la región.