eman ta zabal zazu

Universidad del País Vasco
Euskal Herriko Unibertsitatea

Tesis Doctoral

Desarrollo y caracterización del proceso WAAM basado en GMAW para la fabricación de piezas en acero y aleaciones de aluminio

Presentada por:

Eider Aldalur Urresti

en el

Departamento de Ingeniería Mecánica

perteneciente a la

Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea

Dirigida por

Prof. Dr. Aitzol Lamikiz Mentxaka

Dr. Alfredo Suárez González

Bilbao, diciembre de 2021

Nire gurasoei, Amaia eta Koldo.

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer a todas las personas y entidades que me han apoyado y han sido parte durante el desarrollo de esta tesis.

En primer lugar, quiero mencionar a mis directores de Tesis, Alfredo Suárez y Aitzol Lamikiz. A Alfredo, porque esta tesis sin él no habría sido posible. Gracias por tu confianza y motivación constantes, por animarme a aprender y enfrentar nuevos retos y por tu apoyo en muchos sentidos. Los dos sabemos que a veces ha sido intenso, pero también un gran aprendizaje. A Aitzol por hacer posible esta tesis y por orientarme en el camino.

En segundo lugar, agradecérselo al resto del equipo WAAM. Teresa Artaza, Ángel San Román, Fernando Veiga y Gorka Puertas, creo que hacemos un gran equipo. En especial, gracias a Gorka por todas las horas que hemos pasado en nuestro robot de GMAW. Toda la experimentación de esta tesis ha sido posible gracias a él y lo aprendido sobre el manejo del robot también. Eskerrik asko! También gracias a Fernando por su dedicación y paciencia al ayudarme con la publicación de los artículos. Aunque el primero de Dyna no nos lo aceptaran creo que hemos llegado bastante lejos. Como muestra los artículos publicados dentro de esta tesis. Gracias a Angel por estar siempre disponible para echarme una mano y gracias también a Teresa por hacer en cierta medida el camino conmigo siempre con una sonrisa.

Quiero destacar también el apoyo recibido por parte de todos mis compañeros del área de Fabricación Avanzada de Tecnalia. Amaia Alberdi, Mikel Ortiz, Pedro Ramiro, Antonio Rubio, Jon Borha Fernández, Txomin Ostra, Germán Rodriguez, Alain Gil Del Val y Mariluz Peñalva gracias por los cafés y por estar siempre dispuestos a ayudarme. Y en especial, a Trunal Bhujangrao y Mikel Casuso por recorrer el camino juntos.

Especial agradecimiento también a la empresa ADDILAN S.L., fabricante de máquinas equipadas con tecnología WAAM, por su apuesta por esta tecnología en la que se centra esta tesis y por todos sus esfuerzos para que esta tecnología entre en el mundo industrial. Además, también agradecer al centro tecnológico Tecnalia la oportunidad brindada para el desarrollo de esta tesis.

A todos ellos, muchas gracias.

Eskerrak baita gurasoei emandako denagatik. Gida eta eredu izateagatik. Eskerrak urteetako sostengu eta laguntzagatik. Egindako esfortzu denengatik. Zuek gabe ez nintzatekeen sekula nagoen lekura iritsiko eta tesi honek ez luke inoiz argia ikusiko. Naizena banaiz zuengatik baita hein batean. Gaizkari ere eskerrak hor izatearren, sarri pazientzia galduarazi arren ez baikara gaizki moldatzen.

Kale o baletarrei. Laguntasunaren zentzua ulertu eta hein batean ezberdin izanagatik bat izatearren. Ainhoa, Amaia, Amaia, Leire, Olatz, Aiora, Itziar eta Ihintza. Eskerrak hainbeste elkarrizketa, parranda eta paseogatik. Elkartasunagatik. Adiskidetasunagatik. Debako lagunei zurito ugarien ondoan izandako momentuengatik.

Mattini bide honetan bidaide izatearren. Momentu on eta ez hain onetan. Tesi bat egitea ideia ona ez zela abisatu arren bidea konpartitzearren. Behar denean helduleku izatearren, amildegira erori aurretik jasotzearren. Zaintzearren, irriak eta negarrak partekatzearren, bizi eta biziaraztearren.

Azkenik, Amaia eta Iratiri eskerrak beti hor izatearren. Erlazio berezia baita gurea. Elkarrizketa sakon, eztabaida bizi eta momentu bereziz betea. Zuekin hasi naiz, zuekin ikasi dut eta zuekin bizi naiz. Zortekoa ni zuek ondoan izatearren. Mila esker denagatik!

Mila esker guztioi!

Resumen

La fabricación aditiva es un concepto de producción que ha generado creciente interés en los últimos años. En este tipo de tecnología se parte de un diseño en tres dimensiones y se acaba materializando en un objeto físico mediante la adición de material capa a capa, en vez de sustraerlo de un bloque macizo. Dentro de la fabricación aditiva metálica, dependiendo de la naturaleza del material utilizado y del tipo de fuente de energía, hay diferentes clases de tecnologías, cada una con sus restricciones en cuanto a materiales, calidad, productividad y eficiencia.

Entre las tecnologías de fabricación aditiva metálica, esta tesis se centra en la tecnología conocida como WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*), que se clasifica dentro de la categoría de deposición de energía dirigida (*DED, Directed Energy Deposition*). La tecnología WAAM utiliza un arco eléctrico para fundir el material introducido en el proceso en forma de hilo metálico y lo aporta con la geometría deseada. En concreto, de las diferentes tecnologías WAAM que se pueden encontrar en el mercado, en esta tesis se estudia, en profundidad, el proceso WAAM basado en GMAW (*Gas Metal Arc Welding*).

Este último proceso genera especial interés gracias a que permite la fabricación de piezas grandes con cierta complejidad geométrica con un coste reducido en diversos materiales con altas tasas de aporte. Además, también puede reparar piezas desgastadas o añadir detalles a estructuras básicas, mejorando aún más sus capacidades. Por todo ello, en los últimos años, la tecnología WAAM ha ido generando cada vez más interés en la fabricación industrial y se prevé que será uno de los pilares fundamentales de la industria 4.0.

La presente tesis doctoral se enmarca en el marco de los proyectos HARITIVE y HARI-PLUS llevados a cabo en colaboración con la empresa ADDILAN S.A [ADDILAN, 2021], quien recientemente ha puesto en el mercado su nueva máquina para la fabricación de piezas mediante la tecnología WAAM. El objetivo de estos proyectos ha sido profundizar en el conocimiento de los diferentes procesos WAAM, incorporando los beneficios de cada una de ellas para poder ofrecer al mercado una solución más avanzada.

Los materiales centrales de esta tesis son el acero dulce ER70S-6 y el aluminio 5356. Estos dos materiales son ampliamente utilizados en diferentes industrias para fabricar piezas de gran tamaño sin requerimientos mecánicos especialmente altos con un coste reducido. Aun así, los resultados y las conclusiones obtenidas en esta tesis podrían ser extrapolables a otros materiales férricos u otras aleaciones de aluminio.

La parte experimental de todo el análisis del proceso WAAM basado en GMAW se ha llevado a cabo en un sistema robótico desarrollado en esta tesis y equipado con sistemas de monitorización y control que son de vital importancia para poder ejecutar el proceso de manera adecuada y controlada. En este aspecto, se ha desarrollado e implementado un control de altura basado en señales internas de soldadura para actuar en el proceso de aporte.

Además, se ha estudiado la influencia de los principales parámetros del proceso WAAM basado en GMAW y los diferentes modos de trabajo adecuados para aceros y aluminios, en concreto los modos GMAW pulsado, Cold Arc, Force Arc y AC pulsado.

También, se ha llevado a cabo una comparación de dos estrategias de aporte, estrategia oscilatoria frente a la estrategia de solape, en aceros y se han diseñado modelos de anchura y altura de cordones únicos aportados en aluminio 5356. Además, en los dos materiales especificados, se han estudiado las propiedades mecánicas y la metalurgia obtenida mediante el proceso WAAM basado en GMAW.

Por último, para la validación de los resultados, se han fabricado cuatro demostradores (dos en acero ER70S-6 y dos en aluminio 5356) mediante la tecnología WAAM basado en GMAW y el sistema robótico desarrollado.

Índice de contenidos

ÍNDICE DE CONTENIDOS 1

ÍNDICE DE FIGURAS 6

ÍNDICE DE TABLAS 14

ACRÓNIMOS 17

CAPÍTULO I : INTRODUCCIÓN I-1

1 Contexto tecnológico e industrial I-1

2 Planteamiento del Trabajo de Tesis Doctoral. Objetivos I-5

3 Organización del Trabajo de Tesis Doctoral I-6

CAPÍTULO II : ESTADO DEL ARTE II-1

1 Fabricación aditiva II-1

2 Clasificación de la fabricación aditiva metálica II-4

2.1 Tecnologías de lecho de polvo (*Power Bed Fusion, PBF*) II-5

2.2 Binder Jetting (BJ) II-7

2.3 Sheet Lamination (SL) II-8

2.4 Deposición de energía dirigida (*Directed Energy Deposition, DED*) II-9

3 Tecnología WAAM II-14

3.1 Introducción II-14

3.2 Ventajas y desventajas II-16

3.3 Tipos de tecnologías WAAM II-19

3.3.1 Proceso WAAM basado en GTAW II-20

3.3.2 Proceso WAAM basado en PAW II-20

3.3.3 Proceso WAAM basado en GMAW II-20

4 Proceso WAAM basado en GMAW II-21

4.1 Proceso de trasferencia de material y modos de trabajo II-21

4.1.1 GMAW estándar y GMAW pulsado II-23

4.1.2 Cold Arc II-23

4.1.3 Force Arc II-25
4.1.4 AC pulsado II-25
4.2 Ventajas y desventajas II-26
4.3 Parámetros principales del proceso WAAM basado en GMAW II-27
4.4 Estrategias de aporte II-28
4.5 Suministro térmico durante el proceso de aporte de material II-29
4.6 Procesos WAAM basado en GMAW mejorados II-30
4.6.1 Doble electrodo GMAW tándem II-31
4.6.2 Proceso GMAW/GTAW híbrido II-31
4.6.3 Proceso GMAW-HW II-32
5 Aceros y aleaciones de aluminio II-34
5.1 Aceros II-34
5.2 Aleaciones de aluminio II-37
6 Máquinas comerciales con tecnología WAAM II-41
6.1 ADDILAN II-41
6.2 GEFERTEC II-42
6.3 AML3D II-43
6.4 RAMLAB II-43
6.5 Lincoln Electric II-44
6.6 MX3D II-44
6.7 Universidad de Cranfield II-45
7 Monitorización y control del proceso WAAM II-45
8 Diseño CAD y diseño de trayectorias para WAAM II-49

CAPÍTULO III : DESARROLLO DE UN SISTEMA ROBÓTICO PARA LA TECNOLOGÍA WAAM BASADA EN GMAW CON CONTROL DE ALTURA III-1

1 Introducción III-1
2 Descripción del sistema robótico para WAAM basado en GMAW III-1
3 Parámetros ajustables en el proceso WAAM basado en GMAW sinérgico III-5

4 Modos de trabajo sinérgicos de la fuente de soldadura Titan XQ 400 AC puls (EWM) III-7

5 Desarrollo del control de altura III-14

5.1 Antecedentes III-15

5.2 Descripción del control de altura III-18

5.3 Validación del control de altura: fabricación de un vaso simple ... III-22

6 Conclusiones III-24

CAPÍTULO IV : TECNOLOGÍA WAAM BASADO EN GMAW: ACERO ER70S-6 ..... IV-1

1 Introducción IV-1

2 Materiales y equipamiento IV-1

2.1 Materiales IV-1

2.2 Equipamiento IV-2

2.3 Análisis de los parámetros y modos de trabajo principales del proceso WAAM basado en GMAW: Cordones simples IV-2

2.3.1 Análisis de la influencia de la velocidad de alimentación de hilo (WFR) y el Stick-out en las señales de intensidad y tensión IV-2

2.3.2 Análisis de la influencia de la velocidad de avance (TS) en la geometría de los cordones obtenidos IV-3

2.3.3 Análisis de la influencia de los modos de trabajo principales sobre la penetración, dilución, microestructura y durezas IV-4

2.4 Análisis de la fabricación de una pared simple mediante WAAM basado en GMAW IV-4

2.5 Comparación de las estrategias de oscilación y solape en WAAM basado en GMAW IV-5

2.5.1 Estudio preliminar de selección de parámetros IV-5

2.5.2 Parámetros de fabricación de las paredes IV-8

2.6 Método para la caracterización metalúrgica y mecánica IV-10

3 Resultados y discusión IV-12

3.1 Análisis de los parámetros y modos de trabajo principales del proceso WAAM basado en GMAW: Cordones simples IV-12

3.1.1 Análisis de la influencia de la velocidad de alimentación de hilo (WFR) y el Stick-out en las señales de intensidad y tensión IV-12

3.1.2 Análisis de la influencia de la velocidad de avance (TS) en la geometría de los cordones obtenidos IV-14

3.1.3 Análisis de la influencia de los modos de trabajo principales sobre la penetración, dilución, microestructura y durezas IV-16

3.2 Análisis de la fabricación de una pared simple mediante WAAM basado en GMAW IV-20

3.2.1 Análisis de la macroestructura IV-20

3.2.2 Análisis de la microestructura IV-21

3.2.3 Estudio de la geometría IV-23

3.3 Comparación de las estrategias de oscilación y solape en WAAM basado en GMAW IV-25

3.3.1 Aporte del material y el crecimiento por capa IV-25

3.3.2 Análisis del suministro térmico (*Heat input, HI*) IV-32

3.3.3 Análisis del tiempo de enfriamiento y el tiempo de fabricación ... IV-35

3.3.4 Macroestructura, microestructura y durezas IV-37

3.3.5 Evaluación de las propiedades mecánicas IV-43

3.3.6 Análisis de la geometría IV-46

3.4 Validación IV-50

3.4.1 Molde de paredes delgadas IV-50

3.4.2 Pieza tipo con álabes de un compresor IV-54

4 Conclusiones IV-60

CAPÍTULO V : TECNOLOGÍA WAAM BASADO EN GMAW: ALUMINIO 5356 ..... V-1

1 Introducción V-1

2 Materiales y equipamiento V-1

2.1 Materiales V-1

2.2 Equipamiento V-2

2.3 Análisis de los modos de trabajo sinérgicos GMAW para aleaciones de aluminio: Batería de cordones únicos y paredes simples V-2

2.4 Análisis de la microestructura y de las propiedades mecánicas: Pared solapada V-4

2.5 Métodos para la caracterización metalúrgica y mecánica V-4

3 Resultados y discusión.....V-5

3.1 Modos de trabajo sinérgicos GMAW para aleaciones de aluminio .V-5

3.2 Análisis del tamaño de las gotas transferidas V-7

3.3 Análisis de los modos de trabajo sinérgicos GMAW para aleaciones de aluminio: batería de cordones únicos.....V-7

3.3.1 Análisis del suministro térmico *(Heat input, HI)*.....V-7

3.3.2 Análisis de las secciones transversales y de las penetraciones V-9

3.3.3 Modelos de anchura y altura de los cordones V-13

3.4 Análisis de los modos de trabajo sinérgicos GMAW para aleaciones de aluminio: Paredes simples V-14

3.4.1 Forma geométrica de los cordones aportados.....V-14

3.4.2 Microestructura V-16

3.4.3 Análisis de la porosidad V-19

3.5 Análisis de la microestructura y de las propiedades mecánicas: Pared solapada.....V-21

3.5.1 Microestructura V-21

3.5.2 Durezas V-23

3.5.3 Propiedades mecánicas.....V-23

3.6 Validación.....V-24

3.6.1 Molde para la fabricación de componentes de fibra de carbono..V-24

3.6.2 Torretas de aluminio V-28

4 Conclusiones V-32

CAPÍTULO VI : APORTACIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO VI-1

1 Aportaciones.....VI-1

2 Líneas futuras VI-4

REFERENCIAS..... 1

Índice de figuras

Figura I-1. Concepto de Industria 4.0 aplicada a la fabricación aditiva [INTEGRADDE, 2021] I-2

Figura I-2. Evolución prevista del mercado de la fabricación aditiva metálica con diferentes escenarios causados por la pandemia mundial Covid-19 [AMPOWER, 2020] I-3

Figura I-3. A nivel mundial, desarrolladores de la fabricación aditiva WAAM, distribuidos por tecnologías y materiales I-4

Figura I-4. Antecedentes y evolución de los proyectos asociados a esta tesis I-5

Figura II-1. Representación esquemática de las tecnologías de fabricación de lecho de polvo (PBF) II-6

Figura II-2. Representación esquemática del proceso Binder Jetting (adaptado de [Pragana, 2021]) II-8

Figura II-3. Representación esquemática del proceso Sheet Lamination (adaptado de [*Pragana, 2021])* II-9

Figura II-4. Representación esquemática de las tecnologías DED: a) Tecnología LMD; b) Tecnología EBAM; c) Tecnología WAAM. c.1) Tecnología WAAM basado en GMAW; c.2) Tecnología WAAM basado en GTAW; c.3) Tecnología WAAM basado en PAW (adaptado de [Pragana, 2021]) II-11

Figura II-5. Representación gráfica del proceso GMAW (adaptado de [Hu, 2021]) II-21

Figura II-6. Principales procesos de trasferencia de material II-21

Figura II-7. Proceso y forma de la señal de intensidad y tensión en el modo de trabajo Cold Arc (adaptado de [EWM, 2021]) II-24

Figura II-8. Fases principales del control de alimentación de hilo en el proceso CMT [Prado-Cerqueira, 2017] II-24

Figura II-9. Proceso y forma de la señal de intensidad en el modo de trabajo AC pulsado [EWM, 2021] II-26

Figura II-10. Tecnología de dos electrodos GMAW tándem [Yao, 2016] II-31

Figura II-11. Proceso híbrido GMAW/GTAW introduciendo la antorcha GTAW en bypass (adaptado de [Yang, 2016]) II-32

Figura II-12. Representación gráfica del proceso GMAW-HW (adaptado de [Günther, 2018-a]) II-33

Figura II-13. (a) Puente fabricado por la compañía MX3D en acero inoxidable [MX3D, 2021], (b) Pieza con cavidades internas fabricada en acero [Lincoln

Electric Additive, 2021], (c) Conector de 10 tubos multidireccionales fabricado en hilo YHJ507M [Yili, 2018], (d) Pieza con cavidades internas fabricada en acero [Lincoln Electric Additive, 2021], (e) Parte del brazo de una excavadora fabricada en acero [Greer, 2019]..... II-37

Figura II-14. (a) Pieza de un brazo robótico optimizada topológicamente y fabricada en aluminio [MX3D, 2021], (b) Pieza fabricada para la optimización de las estrategias de aporte por RASM systems en aluminio [Ma, 2019], (c) Pieza de aluminio fabricada mediante WAAM de 10 m de largo [WAAMMAT, 2021], (d) Nervio de aluminio de 2,5 m de largo fabricado mediante WAAM obteniendo ahorros de material de más de 500 kg [Martina, 2015-a], (e) Hélice de barco fabricada mediante WAAM en aleación de níquel-aluminio-bronce [RAMLAB, 2021] II-40

Figura II-15. Máquina ADDILAN v.0.1 [ADDILAN, 2021]..... II-42

Figura II-16. Máquina WAAM GTArc603 [GEFERTEC, 2021]..... II-42

Figura II-17. Máquina ARCEMY para fabricación WAAM basado en GMAW [AML3D, 2021] II-43

Figura II-18. Máquina RAMLAB durante la fabricación de una hélice de barco para el grupo Damen Shipyard [RAMLAB, 2021] II-43

Figura II-19. Solución basada en un robot antropomórfico de la empresa Lincoln Electric [*Lincoln Electric Additive, 2021]* II-44

Figura II-20. Ejemplos de aplicaciones de MX3D en el sector de la construcción [MX3D, 2021] II-44

Figura II-21. Célula robótica de WAAM basado en GMAW con 2 robots trabajando en paralelo, para aumentar la productividad [WAAMMAT, 2021] II-45

Figura II-22. Sistemas de monitorización y control para WAAM (adaptado de [Xia, 2020]) II-47

Figura II-23. Diagrama esquemático de un sistema de control basado en cámaras CCD para el proceso WAAM [Xiong, 2016] II-48

Figura II-24. Rediseño de un brazo robótico mediante optimización topológica [MX3D, 2021] II-50

Figura II-25. Concepto del sistema WAAM integral (adaptado de [Wu, 2018-b]) II-52

Figura III-1. Set-up del sistema con representación detallada de la antorcha de soldadura..... III-2

Figura III-2. Posición de escaneo del robot III-3

Figura III-3. Esquema del protocolo de comunicación utilizado para el sistema robótico desarrollado III-4

Figura III-4. Definición del Stick-out, de la longitud del arco y de la anchura del arco III-7

Figura III-5. Señal de intensidad para el modo GMAW a) estándar y b) pulsado en aceros con gas de protección 20% CO_2 - 80% Ar, diámetro de hilo de 1,2 mm (Job 9) y valores de velocidad de alimentación de hilo de 5 m/min..... III-9

Figura III-6. (a) Forma de la señal de intensidad teórica para el modo de trabajo GMAW pulsado en aceros con gas de protección 20% CO_2 - 80% Ar, diámetro de hilo de 1,2 mm (Job 9) y velocidad de alimentación de hilo de 8 m/min. (b) El proceso de formación de gota y su correlación con la señal de intensidad.. III-10

Figura III-7. Señal de intensidad real para el modo de trabajo GMAW pulsado en aceros con gas de protección 20% CO_2 - 80% Ar, diámetro de hilo de 1,2 mm (Job 9) y velocidad de alimentación de hilo de 8 m/min III-11

Figura III-8. Vaso con pared fina de 3 mm fabricado mediante el modo Cold Arc en acero inoxidable con hilo de diámetro 1 mm III-11

Figura III-9. Señal de intensidad para el modo Cold Arc en aceros con gas de protección 20% CO_2 - 80% Ar, diámetro de hilo de 1,2 mm (Job 194) y velocidad de alimentación de hilo de 5 m/min III-12

Figura III-10. Señal de intensidad para el modo Force Arc a) estándar; b) pulsado en aceros con gas de protección 20% CO_2 - 80% Ar, diámetro de hilo de 1,2 mm (Job 180) y velocidad de alimentación de hilo de 5 m/min III-13

Figura III-11. Señales de intensidad de la fabricación de cordones con WFR=8 m/min y diferentes Stick-outs III-15

Figura III-12. Gráfica FFT de las señales de intensidad de la fabricación de los cordones con WFR=8 m/min y diferentes Stick-outs..... III-16

Figura III-13. Señales de intensidad y sus gráficas FFT adquiridas durante la fabricación de cordones con WFR=16 m/min y diferentes Stick-outs III-16

Figura III-14. Durante la fabricación de las 5 paredes la ondulación del sustrato III-17

Figura III-15. Parte de la señal de intensidad adquirida durante la fabricación de la capa 23 de las 5 paredes solapadas triples..... III-17

Figura III-16. Valores medios de (a) velocidad de alimentación de hilo y (b) intensidad del 60% central del cordón aportado por capa..... III-18

Figura III-17. Relación entre WFR e intensidad en los diferentes Jobs que utilizan el modo de trabajo GMAW pulsado en diferentes materiales. Téngase en cuenta que en la leyenda se resume el material y el Job III-20

Figura III-18. Recta teórica del Job 9 y los valores reales de intensidad media en cordones únicos fabricados con este Job III-20

Figura III-19. Diagrama del control de altura III-21

Figura III-20. (a) WFR, (b) intensidad y (c) altura del robot monitorizados durante la fabricación del vaso de validación III-23

Figura III-21. Vaso fabricado para la validación del control de altura III-23

Figura IV-1. (a) Perfiles adquiridos mediante el escáner láser del cordón 7 donde se pueden apreciar la altura (h) y la anchura (w) del cordón; (b) Imágenes de los cordones 2, 8 y 13 ..... IV-6

Figura IV-2. (a) Trayectoria de la estrategia solapada; (b) Trayectoria de la estrategia oscilada IV-9

Figura IV-3. Intensidad y tensión media durante la fabricación de cada capa en las dos estrategias de fabricación IV-10

Figura IV-4. Macrografía de un cordón con los puntos de medición de durezas y observación de la microestructura señalados IV-10

Figura IV-5. Macrografía de la pared con los puntos de medición de durezas y observación de la microestructura señalados IV-11

Figura IV-6. Distribución de probetas para el análisis de las propiedades mecánicas en la pared oscilada y solapada IV-12

Figura IV-7. Representación de la influencia de la velocidad de alimentación de hilo en los valores medios de intensidad y tensión, (a) en el modo GMAW pulsado, (b) Force Arc y (c) Cold Arc IV-13

Figura IV-8. (a) Representación gráfica de la nube de puntos del cordón 2.7; (b) representación gráfica de la nube de puntos del cordón 2.8; (c) cordones de soldadura fabricados con velocidades de alimentación de hilo de 16 m/min (n. cordón = 2.7, 2.8, 2.9) y (d) representación gráfica de la nube de puntos del cordón 2.9 ..... IV-15

Figura IV-9. Macrografía de la pared simple y detalle del primer cordón aportado IV-21

Figura IV-10. Microestructuras obtenidas en los puntos de la pared simple señalados en la Figura IV-5 ..... IV-22

Figura IV-11. (a) Representación gráfica de la nube de puntos de los cordones pares; (b) Representación gráfica de la nube de puntos de los cordones impares y la representación de la pared efectiva obtenida (en negro) IV-24

Figura IV-12. Definición del volumen de control IV-25

Figura IV-13. Trayectoria de la antorcha y el aporte de gotas durante la fabricación de las paredes oscilada y solapada dentro del volumen de control IV-26

Figura IV-14. Trayectoria de la antorcha y el campo de velocidades durante la fabricación de la pared oscilada IV-27

Figura IV-15. Cálculo del crecimiento volumétrico por capa de las capas 25 y 26 en las dos paredes IV-29

Figura IV-16. Crecimiento volumétrico medio por capa. Téngase en cuenta que las barras de error indican los valores máximos y mínimos IV-29

Figura IV-17. La altura de las paredes en el eje Z medido para representar la evolución del crecimiento volumétrico por capa en las dos paredes.....IV-30

Figura IV-18. (arriba) Apariencia superior del primer cordón aportado con marcas en los laterales debidos a la longitud de onda de la trayectoria oscilatoria; (abajo) Valores de luminancia de las cinco marcas señaladas por el recuadro rojo IV-32

Figura IV-19. Energía suministrada durante la fabricación de la pared (a) solapada y (b) oscilada IV-33

Figura IV-20. (a) Evolución de la temperatura durante el tiempo de enfriamiento entre cordones dentro de la octava capa de la pared solapada; (b) Evolución del tiempo de enfriamiento entre capas a lo largo de la pared solapada; (c) Evolución de la temperatura durante el tiempo de enfriamiento entre capas en las primeras ocho capas de la pared oscilada; (d) Evolución del tiempo de enfriamiento entre capas a lo largo de la pared oscilada.....IV-36

Figura IV-21. (arriba) Representación de la distribución de los ejes en la pared solapada y la pared oscilada; (izquierda) Microestructura de la pared oscilada en los planos YZ y XY; (derecha) Microestructura de la pared solapada en los planos YZ y XY.....IV-38

Figura IV-22. (izquierda) Macroestructuras de las partes superior e inferior de la pared solapada en dirección transversal (plano XZ); (derecha) Microestructuras de la pared solapada. Tenga en cuenta que las micrografías se sacan en las áreas marcadas con los recuadros rojos en las macrografías IV-40

Figura IV-23. (izquierda) Macroestructura de las partes superior e inferior de la pared oscilada en dirección transversal (plano XZ); (derecha) Microestructura

de la pared oscilada. Tenga en cuenta que las micrografías se sacan en las áreas marcadas con los recuadros rojos en las macrografías IV-42

Figura IV-24. Curvas tensión-deformación de las probetas de las paredes oscilada y solapada (a) horizontales y (b) verticales IV-45

Figura IV-25. Secciones transversales de los perfiles y la determinación de la planitud en las partes superiores de las paredes fabricadas mediante (a) estrategia oscilatoria y (b) estrategia solapada IV-48

Figura IV-26. Cálculo del área transversal efectiva de la pared fabricada mediante estrategia (a) oscilada y (b) solapada.....IV-49

Figura IV-27. Cálculo del área transversal efectiva de las paredes fabricadas con diferentes estrategias según la altura y la anchura efectivas IV-50

Figura IV-28. Diseño del molde con las dimensiones principales en mm.....IV-51

Figura IV-29. Molde de paredes delgadas fabricado en acero ER70S-6 .....IV-52

Figura IV-30. Los valores de intensidad, tensión y velocidad de avance monitorizados durante la fabricación del molde y la energía suministrada por unidad de longitud calculada.....IV-53

Figura IV-31. Puntos medidos de la superficie exterior de la pieza (puntos negros) y la forma teórica del molde IV-54

Figura IV-32. a) Diseño original de la pieza con álabes, b) montaje de la pieza con álabes (pieza en cuestión en rosa).....IV-55

*Figura IV-33. (izq.) Rediseño de la pieza con álabes para la tecnología WAAM; (dcha.) Preforma de la pieza con álabes para fabricación mediante WAAM*IV-56

Figura IV-34. Trayectorias generadas para la fabricación de la pieza de validación con alabes.....IV-56

Figura IV-35. Trayectorias de la parte media: (izq.) Trayectorias de las capas pares; (dcha.) Trayectorias de las capas impares.....IV-58

Figura IV-36. Pieza con álabes fabricada y mecanizada.....IV-59

Figura IV-37. Exceso de calor durante la fabricación de la pieza con sustrato de grosor de 10 mm IV-59

Figura V-1. (izq.) Distribución de probetas en la pared solapada; (dcha.) Pared fabricada.....V-5

Figura V-2. Señal de intensidad con WFR=8 m/min: a) GMAW pulsado, b) Cold Arc, c) AC pulsado V-6

Figura V-3. (a) Señales de intensidad superpuestas de los modos GMAW pulsado, Cold Arc y AC pulsado; (b) Señales de frecuencia superpuestas de los tres modos.....V-7

Figura V-4. Valores del suministro térmico (Heat Input, HI) introducidos en la batería de cordones únicos fabricados con los tres modos de trabajo y con velocidades de alimentación de hilo de (a) 4 m/min (casos 1-4) y (b) 8 m/min (casos 5-8) representados en función del ratio V-9

Figura V-5. Macrografías de las paredes (a) GMAW pulsado, (b) Cold Arc y (c) AC pulsado. (a.1) Macrografía tratada para determinar los bordes de las paredes V-15

Figura V-6. Representación de la anchura de la pared (WW) a lo largo de la altura (eje Z), siendo el valor del eje Z nulo en la parte superior de las paredes. También aparecen los valores de la WW y la ondulación superficial calculadas V-16

Figura V-7. Microestructura de la zona central de las paredes fabricadas mediante los modos: (a) GMAW pulsado, (b) Cold Arc y (c) AC pulsado. 1) Microestructura observada mediante microscopio óptico; 2) Mapas EBSD ..V-18

Figura V-8. Distribución del tamaño de grano de los mapas EBSD de las secciones transversales centrales de las tres paredes: (a) GMAW pulsado, (b) Cold Arc y (c) AC pulsado V-19

Figura V-9. Micrografías no atacadas para el análisis de la porosidad: (a) pared GMAW pulsado, (b) pared Cold Arc y (c) pared AC pulsado. (1) Zona superior de las paredes; (2) Zona media de las paredes; (3) Zona inferior de las paredes V-20

Figura V-10. Valores de porosidad media obtenidas con los modos de trabajo GMAW pulsado, Cold Arc y AC pulsado V-21

Figura V-11. Microestructura de la pared solapada en diferentes planos XZ, YZ y XY a diferentes aumentos (x50, x200) V-22

Figura V-12. Diseño de la pieza a fabricar en fibra de carbono mediante el molde de aluminio V-24

Figura V-13. Diseño del molde, cotas en mm.....V-25

Figura V-14. Trayectorias y secuencia de aporte del molde V-25

Figura V-15. (izq.) Molde de aluminio tal y como se obtiene de la fabricación mediante WAAM y (dcha.) tras el mecanizado final V-27

Figura V-16. Proceso de diseño y fabricación de las torretas V-29

Figura V-17. Trayectorias de aporte de dos capas consecutivas de la torreta de aluminio V-31

Figura V-18. Cuatro torretas fabricadas matricialmente V-31

Figura VI-1. Representación de la antorcha del sistema robótico desarrollado en esta tesis con la incorporación del HW VI-5

Índice de tablas

Tabla II-1. Características principales de las tecnologías SLM y EBM II-7

Tabla II-2. Comparativa de los procesos de fabricación aditiva metálica II-13

Tabla II-3. Resumen de la nomenclatura utilizada para la definición de las diferentes paredes fabricadas mediante diferentes estrategias II-29

Tabla II-4. Comparativa de las propiedades mecánicas obtenidas en acero dulce ER70S-6 por diversos autores con estrategias de aporte diferentes ... II-36

Tabla II-5. Propiedades mecánicas del aluminio 5356 fabricado mediante WAAM utilizando como gas de protección el argón o el nitrógeno de alta pureza II-39

Tabla III-1. Parámetros principales del proceso WAAM basado en GMAW sinérgico III-5

Tabla III-2. Principales modos de trabajo para aceros disponibles en la fuente de soldadura Titan XQ 400 AC puls (EWM) III-14

Tabla IV-1. Composición química del hilo de acero ER70S-6 en peso (%) IV-1

Tabla IV-2. Parámetros de los cordones fabricados para ver la influencia de la velocidad de alimentación de hilo IV-3

Tabla IV-3. Parámetros de fabricación de los cordones para ver la microestructura, la dilución y la penetración con cada modo de trabajo IV-4

*Tabla IV-4. Batería de selección de parámetros para la fabricación de paredes con estrategias de oscilación y solape en el modo GMAW pulsado en ER70*IV-5

Tabla IV-5. Resultados medidos y calculados para la definición de la geometría de los cordones IV-7

Tabla IV-6. Parámetros de fabricación de la pared solapada y oscilada IV-9

Tabla IV-7. Parámetros utilizados para fabricar cordones únicos para determinar la influencia de la velocidad de avance y los valores de anchura y altura del cordón obtenidos mediante las mediciones del láser IV-14

Tabla IV-8. Macrografías transversales de los cordones, la dilución y la penetración en los cordones aportados para ver la influencia del modo de trabajo IV-17

Tabla IV-9. Micrografías del cordón 3.1 en cinco puntos definidos en la Figura IV-4 y las durezas correspondientes a estos puntos IV-19

Tabla IV-10. Parámetros relacionados con crecimiento por capa en las dos paredes IV-31

Tabla IV-11. Parámetros relacionados con el suministro térmico en las dos paredes IV-34

Tabla IV-12. Tiempos de fabricación.....IV-37

Tabla IV-13. Valores de dureza para las paredes fabricadas.....IV-43

Tabla IV-14. Estudio de la evolución de la dureza en la dirección transversal en las dos paredes fabricadas.....IV-43

Tabla IV-15. En las dos paredes, valores medios de los resultados obtenidos del ensayo de tracción y ensayo Charpy, sus desviaciones estándar y comparación con los valores mecánicos predefinidos por el proveedor del hilo IV-46

Tabla IV-16. Parámetros utilizados para la fabricación del molde de paredes delgadas.....IV-52

Tabla IV-17. Parámetros de fabricación de la pieza de validación con alabes.IV-58

Tabla V-1. Composición química del hilo Al5356 en peso (%).....V-2

Tabla V-2. Parámetros de fabricación de la batería de cordones únicos para los tres modos de trabajo comparados: GMAW pulsado, Cold Arc y AC pulsado V-3

Tabla V-3. Parámetros de fabricación de la pared solapada.....V-4

Tabla V-4. Valores de intensidad, tensión y volúmen de gota transferida calculados para cordones únicos fabricados mediante los tres modos de trabajo con cada nivel de velocidad de alimentación de hilo.....V-8

Tabla V-5. Secciones transversales de los cordones fabricados con WFR = 4 m/min en los tres modos de trabajo V-10

Tabla V-6. Secciones transversales de los cordones fabricados con WFR = 8 m/min en los tres modos de trabajo V-11

Tabla V-7. Anchura, altura y penetración de los cordones fabricados con los tres modos de trabajo.....V-12

Tabla V-8. Resultados de los valores de dureza de la pared solapada.....V-23

Tabla V-9. Valores obtenidos del ensayo de tracción y ensayo de resiliencia de la pared solapada de aluminio 5356.....V-23

Tabla V-10. Parámetros de fabricación del molde de aluminio 5356 .....V-27

Tabla V-11 Comparación de los pesos del diseño original, el rediseño optimizado topológicamente para AM y los rediseños optimizados topológicamente para WAAM.....V-29

Tabla V-12. Parámetros utilizados para la fabricación de una única torreta y las cuatro torretas matriciales V-30

Acrónimos

FA	Fabricación aditiva
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Diseño asistido por ordenador (*Computer-Aided Design*)
PBF	Tecnologías de lecho de polvo (*Power Bed Fusion*)
DED	Deposición de energía dirigida (*Directed Energy Deposition*)
BJ	Binder Jetting
SL	Sheet Lamination
ME	Material Extrusion
MJ	Material Jetting
VP	Estereolitografía (*Vat Photopolymerization*)
SLM	Fusión selectiva por láser (*Selective Laser Melting*)
EBM	Fusión por haz de electrones (*Electron Beam Melting*)
DMLS	Sinterización directa por láser de metales (*Directed Metal Laser Sintering*)
LOM	Laminated Object Manufacturing
CBAM	Composite Based Additive Manufacturing
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing
LMD	Laser Metal Deposition
EBAM	Electron Beam Additive Manufacturing
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
NNS	Near Net Shape
WFR	Velocidad de alimentación de hilo (*Wire Feed Rate*)
TS	Velocidad de avance (*Travel Speed*)
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
PAW	Plasma Arc Welding
CMT	Cold Metal Transfer
HW	Hilo caliente (*Hot Wire*)

CAM	Fabricación asistida por ordenador (*Computer-Aided Manufacturing*)
DR	Tasa de aporte (*Deposition Rate*)
DPM	Dynamic Path Modification
HAZ	Zona térmicamente afectada *(Heat Affected Zone)*
CG	Característica Geométrica
OVL	Solapada (*Overlapped*)
OSC	Oscilada (*Oscillated*)
HI	Suministro térmico (*Heat Input*)
UTS	Tensión última de rotura (*Ultimate Tensile Strength*)
YS	Límite elástico (*Yield Strength*)
EBSD	Análisis de difracción por retroceso de electrones (*Electron Back-Scattered Diffraction*)
PSD	Densidad espectral de potencia (*Power Spectral Density*)
WW	Anchura de pared (*Wall Width*)

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1 Contexto tecnológico e industrial

La fabricación aditiva (FA) es un concepto de producción que ha generado creciente interés en los últimos años dentro de diferentes sectores industriales. En este tipo de tecnología se parte de un diseño digital de tres dimensiones (3D) y se acaba materializándolo en un objeto físico mediante la adición o fusión de material capa a capa [Herzog, 2016]. ASTM ha definido la fabricación aditiva como el conjunto de "procesos donde se une material, generalmente capa a capa, para fabricar piezas a partir de modelos 3D, a diferencia de las metodologías de fabricación sustractivas" [ISO/ASTM, 2015].

La fabricación aditiva ya en un estado de proceso estable apareció por primera vez en 1986 con el proceso de estereolitografía que utiliza una luz ultravioleta para curar polímeros fotosensibles capa a capa [Singh, 2020]. En su origen la fabricación aditiva se denominó impresión 3D, el cual, agrupaba las tecnologías de fabricación que creaban objetos tridimensionales mediante la superposición de capas sucesivas de material. Por ello, a las máquinas dedicadas a la fabricación aditiva se les llama impresoras 3D las cuales tienen capacidad de imprimir piezas o conjuntos de piezas en diferentes materiales. Históricamente, en la década de 1980, las técnicas de fabricación aditiva se consideraban adecuadas solo para la producción de prototipos funcionales o estéticos, y un término más apropiado para ello era el prototipado rápido *(rapid prototyping)* [Guo, 2013].

En cambio, en los últimos años la precisión, la repetibilidad y la gama de materiales que posibilita la impresión 3D han aumentado hasta el punto de que algunas tecnologías se consideran viables para la producción industrial, por lo que el término "fabricación aditiva" entra a debate como sinónimo de impresión 3D [Li, 2019]. De esta manera, recientemente la fabricación aditiva está siendo impulsada por la demanda de componentes reales de ingeniería con mejores prestaciones económicas, medioambientales y de diseño. Se prevé que este tipo de tecnologías van a ser disruptivas y transformarán el tejido productivo mundial convirtiéndose en una herramienta imprescindible para varios sectores industriales.

La industria 4.0, se basa en la integración de sistemas de producción inteligentes y tecnologías de la información en los sistemas industriales actuales para crear sistemas de producción inteligentes y avanzados. De esta manera, la Industria 4.0 tiene como objetivo la interconectividad, la automatización, el aprendizaje automatizado y la adquisición y el tratamiento de

datos en tiempo real. Esta integración ciber física facilita fábricas inteligentes con alta eficiencia que son capaces de fabricar productos personalizados y de alta calidad. En este camino, la fabricación aditiva da respuesta al desarrollo del sistema productivo que plantea la Industria 4.0, facilitando el paso directo del diseño inicial a la pieza final. Además, también posibilita la fabricación de piezas con gran libertad de diseño y su personalización. De hecho, la existencia de la cuarta revolución industrial depende en parte de las capacidades que se adquieran en las diversas tecnologías aditivas y estas marcarán el desarrollo de esta nueva era industrial [Dilberoglu, 2017]. En concreto, el concepto de la Industria 4.0 aplicada a las tecnologías de fabricación aditiva se puede apreciar en la Figura I-1.

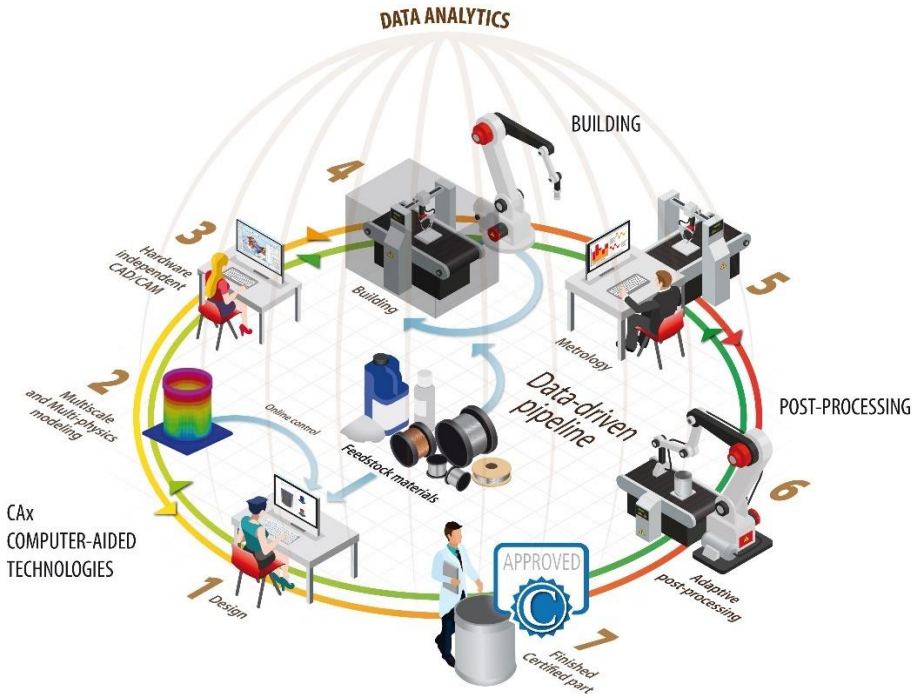


Figura I-1. Concepto de Industria 4.0 aplicada a la fabricación aditiva [INTEGRADDE, 2021]

Las previsiones iniciales del crecimiento del mercado de la fabricación aditiva metálica eran optimistas, pero han sido reducidas a causa de la pandemia mundial del Covid-19 (Figura I-2). Es de esperar que la contracción del mercado a causa de la pandemia retrase las previsiones varios años, ya que se necesitará un tiempo para una recuperación total de los mercados. A partir del 2025 se prevé un aumento del mercado de la fabricación aditiva, pero no será hasta el 2030 cuando el sector experimentará un incremento considerable [Harrop, 2020].

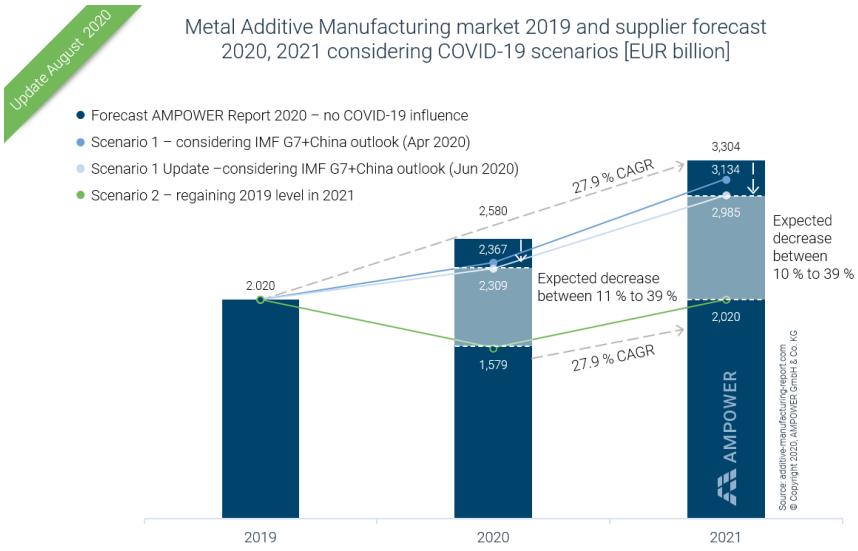


Figura I-2. Evolución prevista del mercado de la fabricación aditiva metálica con diferentes escenarios causados por la pandemia mundial Covid-19 [AMPOWER, 2020]

Entre todas las tecnologías clasificadas dentro de la fabricación aditiva metálica que se explicarán posteriormente, la tecnología WAAM utiliza un arco eléctrico para fusionar el material introducido en forma de hilo metálico aportándolo con la geometría deseada. Se proyecta que la demanda de esta tecnología mejorará en los próximos años con la creciente penetración de la fabricación aditiva en múltiples industrias, como la industria del automóvil, industria aeroespacial, defensa, industria médica, sector oíl & gas… Además, esta tecnología permite la fabricación de estructuras grandes y complejas, y puede reparar piezas desgastadas o añadir detalles a estructuras básicas, mejorando aún más su demanda en los próximos años.

Por todo ello, en los últimos años, la tecnología WAAM ha ido generando cada vez más interés en el sector de la fabricación industrial gracias a la posibilidad de fabricar piezas metálicas de gran tamaño y complejidad geométrica media con un coste reducido [Cunningham, 2018]. En la Figura I-3 se pueden observar, a nivel mundial, los principales fabricantes de máquina y desarrolladores de la tecnología.

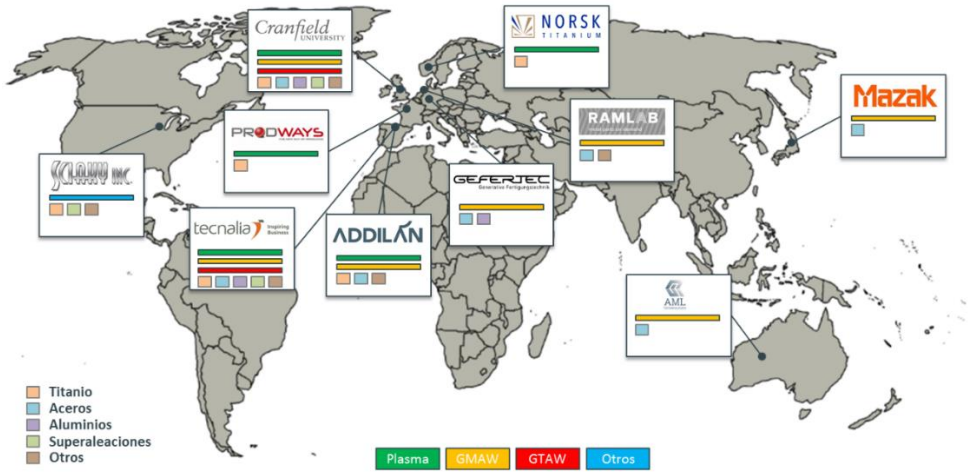


Figura I-3. A nivel mundial, desarrolladores de la fabricación aditiva WAAM, distribuidos por tecnologías y materiales

En este contexto, la empresa ADDILAN S.A. recientemente ha puesto en el mercado su nueva máquina para la fabricación de piezas mediante la tecnología WAAM. Como se muestra en la Figura I-4, ADDILAN S.A. es el resultado de un desarrollo de I+D entre dos de las empresas más importantes de Máquina Herramienta en Euskadi, Grupo Maher Holding y ONA Electroerosión. Ambas empresas, Goratu desde el lado de Maher Holding, y ONA empezaron a colaborar en el proyecto EUSKADDI, dentro de la convocatoria Etorgai 2014 con la idea de posicionarse dentro de la fabricación aditiva con soluciones de aporte directo para metales. Como resultado destacado de este proyecto, ambas empresas decidieron apostar por la tecnología WAAM, y aportar cada uno sus mejores capacidades para poder presentar al mercado una solución diferencial de máquina y tecnología. En el año 2017, se creó la empresa ADDILAN dando continuidad a la línea de desarrollo dentro del proyecto HARITIVE. El proyecto HARITIVE, supuso un hito disruptivo en la industria al presentar la primera máquina basada en control CNC para fabricación aditiva mediante tecnología WAAM. Para proseguir el desarrollo llevado a cabo, se presentó el proyecto HARI-PLUS en 2019. Este proyecto, tenía como objetivo profundizar en el conocimiento de los diferentes procesos WAAM, incorporando los beneficios de cada uno de ellos para poder ofrecer al mercado una solución más avanzada. De esta manera, la presente tesis se enmarca en los proyectos HARITIVE y HARI-PLUS llevados a cabo en colaboración con la empresa ADDILAN.

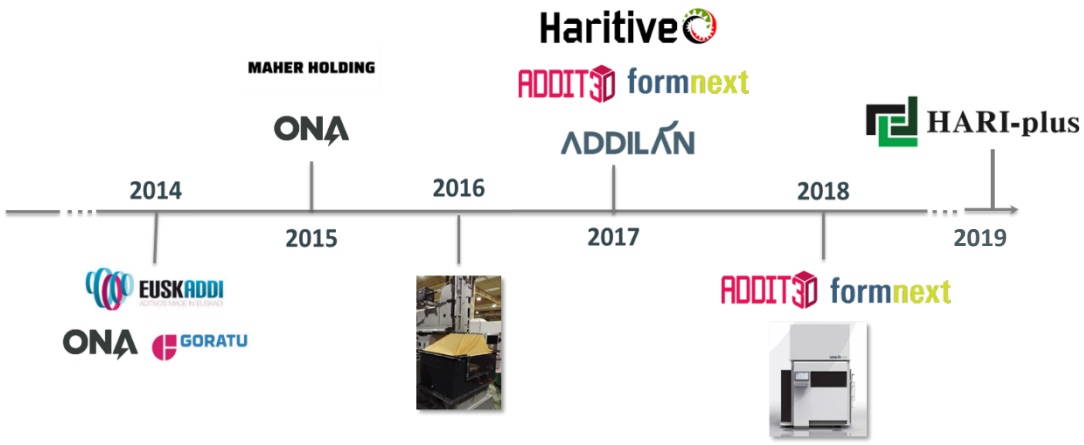


Figura I-4. Antecedentes y evolución de los proyectos asociados a esta tesis

2 Planteamiento del Trabajo de Tesis Doctoral. Objetivos

A pesar de que en los últimos tiempos se está estudiando intensivamente el proceso WAAM basado en GMAW, en la literatura no se han reportado aun estudios en detalle, sobre algunos temas importantes, tales como la forma de la señal de intensidad introducida en el proceso y su efecto, diferentes estrategias de aporte o la relación entre los diferentes modos de trabajo y la defectología generada, principalmente en términos de porosidad.

De esta forma, el objetivo principal de esta tesis doctoral es desarrollar y caracterizar el proceso WAAM basado en GMAW para acero dulce ER70S-6 y aluminio 5356, empleando para ello un sistema robótico.

Para alcanzar este objetivo general, los objetivos tecnológicos que ha perseguido este trabajo son:

1. Desarrollar un sistema robótico para la fabricación automatizada y controlada de piezas mediante la tecnología WAAM basado en GMAW, con la integración de instrumentos de monitorización y control.
2. Diseñar e implementar sistemas de control adaptados para el proceso WAAM basado en GMAW para conseguir un aporte óptimo y sin defectos.
3. Estudiar la influencia de los principales parámetros del proceso WAAM y los diferentes modos de trabajo en acero ER70S-6.
4. Comparar la estrategia de oscilación frente a la estrategia de solape, en términos de crecimiento por capa, suministro térmico, microestructura, propiedades mecánicas y geometría.
5. Estudiar la influencia de los modos de trabajo más adecuados para la aleación de aluminio 5356.

6. Diseñar modelos que predigan la anchura y la altura de los cordones aportados por GMAW en función de los parámetros de proceso más significativos.

3 Organización del Trabajo de Tesis Doctoral

Con el fin de abordar de una manera estructurada los objetivos tecnológicos que se han presentado en el apartado anterior, el presente trabajo de Tesis Doctoral se ha estructurado de la siguiente manera:

1. En el primer capítulo se ha presentado el contexto tecnológico e industrial actual de la fabricación aditiva, así como los objetivos de esta tesis.
2. En el segundo capítulo, se ha realizado una revisión bibliográfica que resume el Estado del Arte de la fabricación aditiva metálica, centrándose especialmente en la tecnología WAAM basado en GMAW. En primer lugar, se ha hecho una revisión de los procesos de trasferencia de material y modos de trabajo en esta tecnología, así como de las estrategias de aporte del material y del suministro térmico que se produce durante el proceso de aporte. En segundo lugar, se analizan los resultados publicados sobre las diferentes estrategias que se han encontrado en bibliografía para la mejora del proceso WAAM basado en GMAW. A continuación, se estudian las publicaciones sobre los dos materiales aportados mediante WAAM a lo largo de esta tesis: el acero ER70S-6 y el aluminio 5356. Por último, se han nombrado las máquinas con tecnología WAAM desarrolladas por diferentes fabricantes y los sistemas de monitorización y control diseñados por otros autores.
3. En el tercer capítulo, se ha presentado el desarrollo de un sistema robótico que integra el proceso WAAM basado en GMAW, que se ha equipado con un sistema de monitorización y control. Este sistema de monitorización y control es de extrema importancia para poder ejecutar el proceso de manera adecuada y controlada.
4. En el cuarto capítulo, se ha descrito la experimentación llevada a cabo en acero dulce ER70S-6 fabricado mediante la tecnología WAAM basado en GMAW en el sistema robótico desarrollado en el capítulo III. En primer lugar, se han fabricado cordones simples para estudiar la influencia de los principales parámetros del proceso y los diferentes modos de trabajo adecuados para aceros (GMAW pulsado, Cold Arc y Force Arc). En segundo lugar, se ha analizado metalúrgica y geométricamente una pared simple, es decir, de un único cordón en

cada capa. Y, por último, se ha hecho una comparación de la estrategia de oscilación frente a la estrategia de solape. Además, para la validación de los resultados obtenidos, se han fabricado dos demostradores en este material.

5. En el quinto capítulo, se ha replicado la experimentación llevada a cabo para el acero ER70S-6 descrito en el capítulo IV para el aluminio 5356 a excepción del estudio de las estrategias de aporte. Además, se han desarrollado modelos experimentales que permiten predecir la anchura y altura de los cordones aportados en función de los parámetros de proceso más significativos.
6. En el sexto y último capítulo, se han presentado las principales aportaciones que realiza este trabajo de investigación sobre el Estado del Arte, así como las líneas de investigación que se abren con el mismo de cara al futuro.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

1 Fabricación aditiva

Una de las ventajas clave de la fabricación aditiva es la capacidad de producir piezas de gran complejidad geométrica que de otro modo serían imposibles de fabricar, incluidas piezas huecas, piezas con detalles complejos o piezas con complejas celosías internas. Por lo tanto, mediante la fabricación aditiva se obtiene gran libertad de diseño siendo esto vital, por ejemplo, para aplicaciones que requieren reducción de peso. Esta reducción se puede dar mediante la optimización topológica del diseño [Zhu, 2021], añadiendo celosías internas en vez de tener piezas macizas o pudiendo fabricar en una sola pieza partes que con técnicas tradicionales necesitan muchos subcomponentes. Por ejemplo, General Electric introdujo en su motor de avión CFM LEAP, inyectores de combustible fabricados mediante fabricación aditiva, reduciendo el inyector a un único componente 25% más ligero que el sistema inicial de 18 piezas [General Electric, 2017].

La customización también se convierte en una opción [Tofail, 2018], ya que con técnicas tradicionales de fabricación la customización de piezas complejas queda limitada por el coste que supone. Esto, mayoritariamente, se debe a la necesidad de utillajes complejos que exigen tiradas largas y por lo tanto, la customización queda en entredicho. En cambio, ya que mediante la fabricación aditiva se fabrican piezas directamente desde un diseño asistido por ordenador (*Computer Aided Design, CAD*), la fabricación de piezas únicas y personalizadas es viable sin necesidad de utillajes costosos [Satish Prakash, 2018].

Hasta la actualidad, las técnicas sustractivas convencionales fabricaban las piezas partiendo de un bloque macizo, extrayendo el material necesario hasta obtener la geometría deseada. En cambio, las tecnologías clasificadas dentro de la fabricación aditiva añaden o funden el material solo donde es necesario, minimizando la cantidad de materia prima utilizada y por lo tanto, reduciendo sustancialmente el coste de la pieza a fabricar [Hosseini, 2019]. En consecuencia, la fabricación aditiva podría tener un gran nicho de mercado, por ejemplo, en la industria aeronáutica a causa del alto precio de los materiales utilizados (titanio, aleaciones de níquel, etc.) y del extremadamente alto ratio *buy-to-use* de los componentes [Ding, 2015-a].

De esta manera, mediante las tecnologías aditivas se obtiene una pieza de geometría cuasi final (considerándose un proceso *Near Net Shape*) con una tasa de aprovechamiento de la materia prima muy elevada, que sin

postprocesados o con postprocesados reducidos se podrá llegar de la preforma fabricada a la pieza final [Tofail, 2018]. En este contexto, se introduce el termino *Hybrid Manufacturing* que contempla los procesos de fabricación basados en la combinación de procesos aditivos y tradicionales (comúnmente, procesos de mecanizado) para fabricar piezas difíciles (o incluso imposibles) de obtener mediante cada uno de los procesos por separado. Además, mediante esta hibridación se pueden superar las limitaciones de los procesos aditivos relacionadas con la baja productividad, la calidad de la superficie rugosa y la falta de precisión dimensional [Pragana, 2021].

Las tecnologías aditivas han demostrado un gran potencial para reducir el consumo de energía al minimizar el desperdicio de material y eliminar o reducir los pasos de mecanizado. En estudios anteriores se ha predicho que la implementación generalizada de la fabricación aditiva conduciría a una reducción significativa de la demanda global de energía hasta en un 27% [Sun, 2021].

Hoy en día la fabricación aditiva puede generar piezas con densidad total en una amplia gama de materiales, tales como, polímeros [Jafferson, 2021], metales [Herzog, 2016], materiales cerámicos [Zhang, 2020-c], composites [Parandoush, 2017], etc. La fabricación aditiva de materiales poliméricos probablemente ha sido la más estudiada, gracias a las bajas temperaturas de procesamiento y fusión que se utilizan en este tipo de materiales y a que no necesitan ni gases de protección ni atmósferas protegidas para su procesamiento. En cambio, las temperaturas de fusión de los materiales metálicos y cerámicos son más altos por lo que no son tan sencillos de procesar [Tofail, 2018]. Aun así, la fabricación aditiva de estos materiales está ganando mucho interés en los últimos tiempos. Además, las tecnologías aditivas también dan opción de generar piezas multimateriales, es decir, que están compuestas por más de un material, no posibles hasta el momento con técnicas tradicionales de fabricación [Bandyopadhyay, 2018].

En los últimos 30 años se ha utilizado la fabricación aditiva en diversos sectores, tales como, el sector aeroespacial [Shi, 2020], el sector aeronáutico [Gisario, 2019], la industria automotriz [Delic, 2020], el sector biomédico [Rezvani, 2021], el sector de la energía [Ermakova, 2019] [Sun, 2021], el sector de las herramientas, utillajes y moldes [Hao, 2021], el sector de la construcción [Paolini, 2019], etc.

-Sector aeronáutico y aeroespacial: En estos sectores los componentes normalmente tienen geometrías complejas y están fabricados en materiales metálicos de altas prestaciones como aleaciones de titanio, aleaciones de

níquel, aceros especiales y cerámicas que pueden trabajar a temperaturas muy elevadas. La fabricación convencional de este tipo de piezas suele ser costosa y larga y, además, las tiradas suelen ser cortas (del orden de unos miles de piezas) por lo que la fabricación aditiva en este tipo de sectores tendrá un gran nicho de mercado [Guo, 2013].

-Sector del automóvil: En la industria automotriz las tiradas suelen ser largas y por ello, la fabricación aditiva se utiliza, sobre todo, en la etapa de diseño, siendo importante para reducir los tiempos de diseño y desarrollo de nuevos componentes minimizando los costes del ciclo de desarrollo. Además, también se han utilizado este tipo de tecnologías para fabricar piezas de tiradas cortas de partes estructurales y funcionales como escapes de motor, ejes de transmisión, componentes de la caja de cambios y sistemas de frenado para vehículos de lujo, pero no para piezas con alto volumen de producción de los automóviles convencionales. Por último, también se utilizan estas tecnologías en la fabricación de vehículos para deportes de motor, ya que suelen utilizarse piezas en aleaciones ligeras (por ejemplo, titanio) con estructuras muy complejas y bajos volúmenes de producción [Satish Prakash, 2018].

-Sector biomédico: Los desarrollos recientes en tecnologías de la fabricación aditiva, así como en biomateriales, ciencias biológicas y biomedicina, han ampliado la aplicación de las técnicas de fabricación aditiva en el campo biomédico fabricando productos ortopédicos, implantes, *scaffolds* para crecimiento de tejidos, órganos artificiales, dispositivos médicos, redes microvasculares, chips biológicos, etc. [Sheoran, 2020].

-Sector energético: En los últimos años, las tecnologías aditivas se han aplicado cada vez más en nuevos desarrollos de generación, conversión y almacenamiento de energía con el objetivo de mejorar el rendimiento y mejorar la eficiencia energética de los sistemas. Por ejemplo, en las plantas de energía nuclear, la fabricación aditiva permite la fabricación de piezas *in situ* y acelera el despliegue de componentes del núcleo nuclear para la flota de reactores actuales y los reactores avanzados futuros. Las técnicas de FA también se han utilizado para fabricar compuestos funcionales para adaptar las propiedades electroquímicas de las pilas de combustible [Hughes, 2019].

-Sector de las herramientas, utillajes y moldes: La utilización de la fabricación aditiva es adecuada para los casos de producción de baja tirada en los que la capacidad de crear geometrías complejas puede mejorar el rendimiento de las herramientas, utillajes o moldes. Además, también puede

ser una buena opción para los casos en los que aparecen grandes pérdidas de materiales costosos.

-Sector de la construcción: En el sector de la construcción, los modelos arquitectónicos se han creado con estos métodos durante más de una década. Además, en los últimos años se ha visto un gran aumento en la investigación sobre métodos de impresión para componentes de construcción, en hormigón o cemento. De esta manera, aplicando procesos de fabricación aditiva se han implementado los primeros proyectos de construcción [Paolini, 2019] [Craveiro, 2019]. Como ejemplo, la compañía MX3D ha fabricado e instalado en Amsterdam un puente con un diseño optimizado topológicamente de acero inoxidable fabricado mediante la tecnología WAAM basado en GMAW [MX3D, 2021].

Se dice que la fabricación aditiva será parte de la Cuarta Revolución Industrial, definido también como, Industria 4.0, donde se buscará una fabricación más flexible, versátil, customizable y rápida.

Aun así, hoy en día hay diversos aspectos que mejorar en la fabricación aditiva para que sea un proceso industrial real y competitivo. Se necesita una perspectiva teórica para comprender mejor cómo la fabricación aditiva puede ser utilizado en los sistemas de producción industriales [Eyers, 2017]. En procesos productivos en masa, por ejemplo, la fabricación aditiva tiene algunos límites, ya que tanto la velocidad de fabricación como la repetitividad son bajas. De esta manera, estas técnicas hasta ahora han sido utilizadas para la fabricación de piezas únicas y para aplicaciones de reparaciones, pero hoy en día, el reto es incorporarlos en cadenas de producción reales. Además, la optimización y la selección adecuada de los parámetros de proceso y la incorporación de sistemas de control y monitorización son cruciales para conseguir un control absoluto de este tipo de tecnologías.

2 Clasificación de la fabricación aditiva metálica

Dentro de la fabricación aditiva, cada tipo de tecnología consiste en una combinación particular de una fuente de energía, del formato del material de aporte y de una cinemática de maquina concreta, haciendo que cada una sea adecuada para una aplicación dada. De acuerdo con la terminología estándar creada por ASTM (ASTM F2792), las tecnologías de fabricación aditiva se clasifican en siete categorías [ISO/ASTM, 2015] siendo las primeras cuatro utilizables para la fabricación de componentes en materiales metálicos [Zhang, 2018-b]:

1. Tecnologías de lecho de polvo (*Power Bed Fusion, PBF*)
2. Binder Jetting (BJ)
3. Sheet Lamination (SL)
4. Deposición de energía dirigida (*Directed Energy Deposition, DED*)
5. Material Extrusion (ME)
6. Material Jetting (MJ)
7. Estereolitografía (*Vat Photopolymerization, VP*)

En cuanto a materiales metálicos, existe una amplia variedad de técnicas de fabricación tradicionales. Entre los más habituales se encuentran la fundición, la forja y el mecanizado, y éstas siguen siendo los pilares de la industria del metal en todo el mundo. En cambio, la fabricación aditiva en este tipo de materiales es relativamente nueva (años 80) y ofrece varias técnicas automatizadas que se basan en la producción capa a capa. Inicialmente, la fabricación aditiva en metales solo se desarrolló para el prototipado rápido, sin embargo, estas técnicas aditivas están siendo impulsadas por la demanda de la fabricación de componentes reales de ingeniería para volúmenes bajos a medianos y con mejores características medioambientales y económicas.

Hoy en día, los procesos de fabricación aditiva basados en materiales metálicos posibilitan un gran ahorro de material y energía, reduciendo el coste y el impacto medioambiental de la fabricación de diversos componentes. Además, con estas técnicas se pueden fabricar piezas con geometrías complejas (no posibles con técnicas tradicionales de fabricación) e incluso se pueden reparar piezas de alto valor añadido. De esta manera, se pueden obtener piezas con alta exactitud geométrica manteniendo propiedades mecánicas adecuadas.

2.1 Tecnologías de lecho de polvo (*Power Bed Fusion, PBF*)

Se trata de métodos que parten de material en polvo y que lo consolidan capa a capa con la idea de generar una pieza 3D. En general, el principio básico de este tipo de tecnologías es que la energía térmica proporcionada por una fuente de energía (un rayo láser o un haz de electrones) fusiona o sinteriza regiones selectivas de un lecho de polvo. Durante el proceso, primero, se esparce la primera capa de polvo sobre la plataforma de fabricación mediante un rodillo y se escanea utilizando la fuente de energía, haciendo que las partículas de polvo solidifiquen según la geometría de la pieza a fabricar en esa capa [Cook, 2020]. Después, la plataforma de fabricación desciende una capa de espesor y se esparce otra capa de polvo encima. Este proceso se repite hasta que el objeto esté completamente fabricado como se observa en la

Figura II-1 [Bhavar, 2014]. Una vez terminada la pieza, se saca de la cama de polvo y se le aplican los postprocesados necesarios.

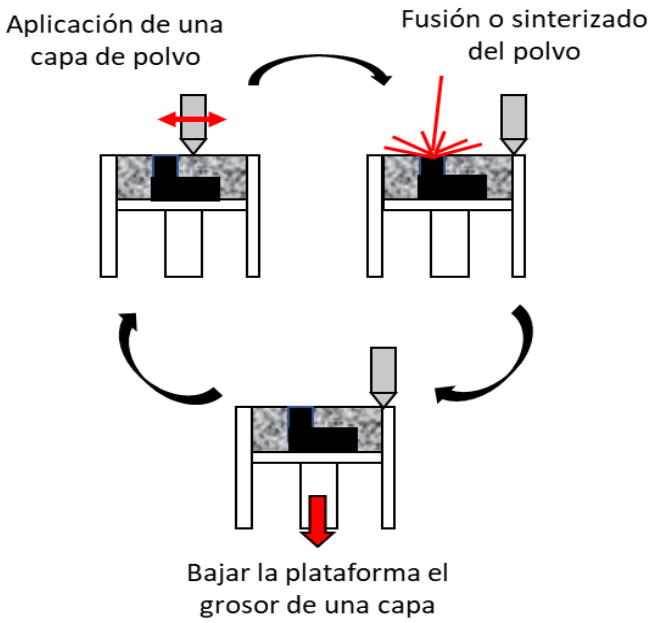


Figura II-1. Representación esquemática de las tecnologías de fabricación de lecho de polvo (PBF)

Las tecnologías clasificadas dentro de PBF son las más extendidas en la fabricación aditiva metálica en sectores como la industria biomédica, industria aeroespacial e industria aeronáutica [Singh, 2019] debido a su capacidad para producir piezas geométricamente complejas con gran libertad de diseño utilizando rayos láser o haces de electrones de alta precisión [Chin, 2020]. Además, con esta tecnología es posible obtener excelentes acabados superficiales y gran resolución geométrica, lo cual es realmente útil para fabricar piezas pequeñas-medianas geométricamente complejas. Aun así, las tecnologías de lecho de polvo presentan una gran limitación de tamaño y productividad, ya que las tasas de aporte son relativamente bajas (máximo 150 cm^3/h) y el tamaño de las piezas a fabricar está limitado por el tamaño del área de trabajo de las máquinas [Bhavar, 2014]. Además, los costes operativos son comparativamente altos en este tipo de tecnologías debido al coste elevado de la materia prima y de las máquinas, a los problemas de reciclado de polvos metálicos, a los cambios de material difíciles y a los requisitos de las instalaciones para gas inerte y seguridad. Otra de las principales características de estos procesos suele ser que la tecnología está en manos de los principales fabricantes de máquina (EOS, GE Additive, Renishaw, SLM solutions, etc.) y se ofrece una solución cerrada, en la que el usuario no solo recibe la máquina, sino que también el material, la tecnología, el software, etc. [Udroiu, 2012].

La tecnología PBF incluye diferentes procesos para materiales metálicos, como la fusión selectiva por láser (*Selective Laser Melting, SLM*) y la fusión por haz de electrones (*Electron Beam Melting, EBM*). Las características principales de estos procesos se pueden observar en la Tabla II-1. Los procesos SLM y EBM tienen principios de trabajo similares, ambos funden el polvo capa a capa a través de un láser o un haz de electrones respectivamente. Además, EBM necesita una cámara de vacío para trabajar y en cambio, SLM solo atmósferas protegidas [Dev Singh, 2020].

Tabla II-1. Características principales de las tecnologías SLM y EBM

	SLM	**EBM**
Fuente de energía	Uno o más láseres de fibra de 200-1000 W	Haz de electrones de alta potencia de 3000-6000 W
Atmósfera de la cámara	Atmósfera inerte	Vacío
Precalentamiento de polvo	Precalentamiento de la plataforma	Mediante escaneo
Necesidad de soportes	Si	No
Volumen de fabricación máximo (mm)	800x400x500 [GE Additive, 2021-a]	350x430 (Ø x H) [GE Additive, 2021-b]
Máxima tasa de aporte (cm^3/h) [Bhavar, 2014]	20-150	80
Grosor de capa (µm) [Singh, 2019]	20-150	50-200
Acabado superficial (µm) (Ra) [Bhavar, 2014], [Gokuldoss, 2017], [Herderick, 2011]	4-11	25-35
Tolerancia geométrica (mm) [Bhavar, 2014], [Mcwilliams, 2017]	±0,05-0,1	± 0,2
Tamaño mínimo de detalles (µm) [Bhavar, 2014]	40-200	100

2.2 Binder Jetting (BJ)

El proceso *Binder Jetting* utiliza dos materiales; un material en forma de polvo y un aglutinante. Como se observa en la Figura II-2 el proceso de impresión consiste principalmente en la pulverización del aglutinante líquido sobre el lecho de polvo. Para ello, el cabezal de impresión se mueve horizontalmente describiendo la forma geométrica de la pieza a fabricar y el aglutinante actúa como adhesivo entre las capas de polvo. Después, se baja la plataforma de construcción el grosor de una capa como en los procesos PBF y

mediante un rodillo se esparce la siguiente capa de polvo y se repite el proceso hasta conseguir la geometría final de la pieza. Una cámara de construcción calentada puede ayudar a acelerar el proceso de impresión al aumentar la viscosidad de los materiales [Karlsson, 2019].

Los polvos para BJ están disponibles en una gran variedad de materiales, como metales, polímeros y materiales cerámicos [Kunchala, 2018]. Por otro lado, el volumen de construcción de las máquinas *Binder Jetting* se encuentra entre los más grandes del mercado en comparación con otras de las tecnologías aditivas (hasta 800 x 500 x 400 mm) [ExOne, 2021].

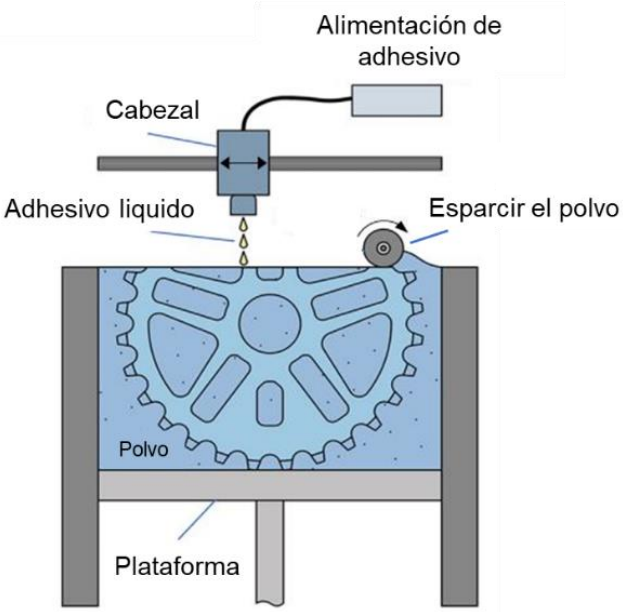


Figura II-2. Representación esquemática del proceso Binder Jetting (adaptado de [Pragana, 2021])

2.3 Sheet Lamination (SL)

La tecnología SL utiliza láminas de material para fabricar objetos 3D. En todas estas tecnologías, las láminas se cortan con la forma del objeto deseado y luego de alguna manera se unen para obtener una pieza de tres dimensiones como se observa en la Figura II-3 [Bhatt, 2019]. Dependiendo del material de las láminas existen diferentes tecnologías SL, por ejemplo, para polímeros *Laminated Object Manufacturing (LOM)*, para composites *Composite Based Additive Manufacturing (CBAM)* y para materiales metálicos *Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)*. Dentro de los beneficios de estas tecnologías se encuentran la alta velocidad, el bajo coste y la facilidad de manejo del material.

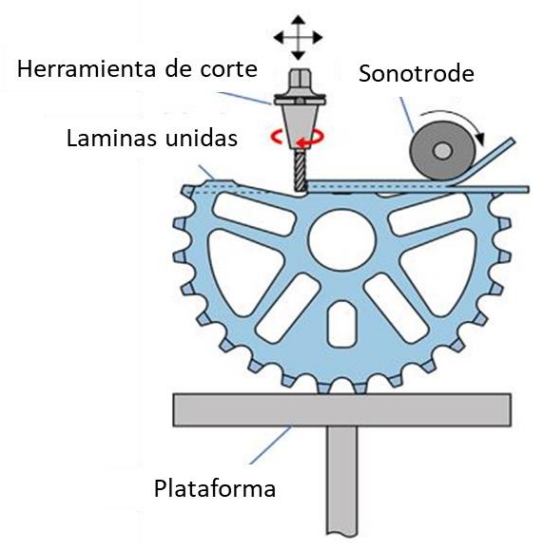


Figura II-3. Representación esquemática del proceso Sheet Lamination (adaptado de [*Pragana, 2021]*)

2.4 Deposición de energía dirigida (*Directed Energy Deposition, DED*)

El proceso de deposición de energía dirigida es un proceso emergente, el cual está en fase de desarrollo e industrialización desde hace poco más de 15 años. Dentro de la tecnología DED se incluyen todas aquellas técnicas donde la fuente de energía funde el material a la vez que se alimenta [Lee, 2017]. La principal ventaja de este tipo de tecnologías, en comparación a los sistemas de lecho de polvo, es la posibilidad de fabricar piezas más grandes en volúmenes de trabajo superiores y la posibilidad de reparar piezas dañadas [Saboori, 2019].

En este tipo de procesos se obtiene una preforma muy cercana a la geometría final de las piezas y se reduce en gran medida la cantidad de material que se debe mecanizar. Además, se parte directamente de un archivo digital que contiene la geometría tridimensional de la pieza y se aporta el material metálico fundiéndolo y aportándolo sobre el material base, generando la geometría por capas. Ya en algunos casos recientes, se ha demostrado que se podrían lograr unos ahorros en el material, el coste y el consumo de energía superiores al 70%, y que los plazos de entrega podrían ser reducidos de manera muy significativa en comparación con la fabricación convencional [Vimal, 2020].

Dentro de las tecnologías DED se tienen procesos con alimentación de material en forma de hilo [Ding, 2015-b] y procesos con alimentación de material en forma de polvo [Frazier, 2014]. La habilidad de utilizar hilo como materia prima en vez de polvo, reduce el precio por kilogramo, aumenta la eficiencia de

utilización del material, reduce la necesidad de sistemas de reciclado de polvos, crea un proceso amigable para el medioambiente y añade la posibilidad de una fácil manipulación del material por el operario sin preocupaciones de seguridad y salud [Wang, 2019] [Jin, 2020].

Como fuente de energía para fundir el material se puede utilizar un láser, un haz de electrones o un arco eléctrico. Así, el cabezal de la fuente de energía y el equipo de alimentación del material se montan en una máquina con una cinemática concreta (un brazo robótico, una máquina Gantry, una máquina cartesiana, etc.) y a través de la misma, se aporta el material donde se desea [Herzog, 2016]. Por ello, en estas tecnologías no suele haber vendedores de máquinas que ofrecen soluciones cerradas.

Por otro lado, dentro de la categoría de DED se diferencian diferentes tipos de procesos dependiendo de la naturaleza de la fuente de energía y del formato del material introducido como se puede ver en la Figura II-4: LMD (*Laser Material Deposition*), EBAM (*Electron Beam Additive Manufacturing*) y WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*) [Pragana, 2021].

En este tipo de tecnologías la energía se direcciona a una región concreta para calentar el sustrato y fundir el material a aportar. La resolución del proceso depende de qué tipo de fuente de energía se use (láser>haz de electrones>arco eléctrico) [Lee, 2017], en cambio, la velocidad de fabricación está relacionada con la tasa de aporte (LMD 1 kg/h < EBAM 10 kg/h < WAAM 10 kg/h).

Además, la eficiencia energética que tiene el láser es reducida (35% máximo), el del haz de electrones es un poco inferior (15-20%) pero nada comparable con el del arco electico que en algunas circunstancias puede llegar al 90% [Ding, 2015-a]. En relación, en comparación con las técnicas que usan el láser, el arco eléctrico es una fuente de energía más eficiente para fundir el material, sobre todo en aleaciones metálicas reflectantes, como el aluminio, el cobre y el magnesio [Cunningham, 2018].

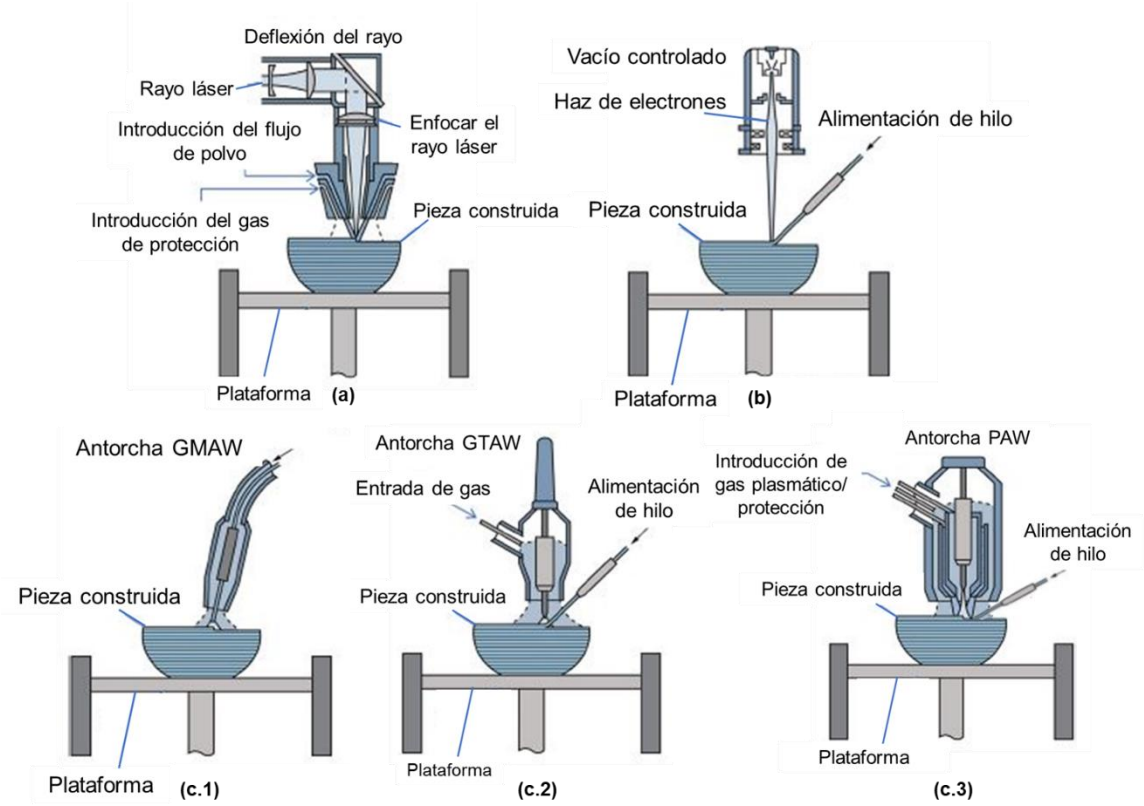


Figura II-4. Representación esquemática de las tecnologías DED: a) Tecnología LMD; b) Tecnología EBAM; c) Tecnología WAAM. c.1) Tecnología WAAM basado en GMAW; c.2) Tecnología WAAM basado en GTAW; c.3) Tecnología WAAM basado en PAW (adaptado de [Pragana, 2021])

En la técnica **LMD**, se alimenta el polvo metálico a través de una boquilla coaxial continua, lateral o multi-jet [Jardon, 2020] y se funde mediante un láser en estado sólido (Nd:YAG), un láser de fibra, un láser de diodo o un láser de CO_2 de potencias 1-5 KW direccionado por sistemas de lentes (Figura II-4 a) [Azarniya, 2019]. En esta tecnología si el metal es reactivo el baño fundido suele estar protegido por un gas de protección inerte para evitar la oxidación del mismo.

Mientras se alimenta y se funde el material, existen dos alternativas para obtener la geometría final de la pieza: la pieza se mueve mientras la boquilla está estacionada, o la más habitual, la boquilla se mueve a través de la máquina mientras la pieza esta quieta [Frazier, 2014]. Este proceso se repite capa a capa hasta formar una pieza tridimensional. Con estas técnicas, en función del tipo de boquilla y del tamaño del spot del láser es posible realizar desde anchas recargas hasta aportes de detalle de pocas décimas de milímetro [Kittel, 2020].

Por otro lado, **EBAM** utiliza material en forma de hilo y lo funde mediante un haz de electrones (Figura II-4 b). Esta tecnología fue desarrollada y

comercializada por primera vez por la empresa SCIAKY en 2004 en colaboración con Boeing [Gisario, 2019] [SCIAKY, 2021]. El proceso se lleva a cabo en vacío y por ello, no es posible llevarlo a cabo alimentando polvos metálicos dada la mala manipulación del flujo de polvo metálico en vacío [Zhang, 2020-a].

Por último, la tecnología **WAAM** consiste en alimentar material en forma de hilo y fundirlo mediante un arco eléctrico. La técnica WAAM se basa en los principios de la soldadura automática, en la que las piezas se fabrican sobre un material base superponiendo capas [Williams, 2016-b]. Este método tienen la capacidad de aporte masivo de material, pudiendo llegar a tasas de aporte de más de 10 kg/h, lo que es mucho mayor que las tasa típicas de aporte de los sistemas láser en polvo (típicamente hasta 1 kg/h) [Ng, 2009]. Por ello, aunque la resolución geométrica es considerablemente inferior que, para el láser, los procesos de aporte por arco son uno de los métodos más económicos para aportar metales en grandes volúmenes. A causa de ello, la tecnología WAAM es especialmente adecuado para piezas de gran tamaño con complejidad geométrica media.

Además, el proceso WAAM a diferencia del proceso EBAM no necesita vacío para trabajar lo que reduce mucho el gasto del equipamiento. Aun así, se necesita gas de protección de manera localizada como en los procesos de soldadura para conseguir un aporte adecuado, incluso en algunos materiales se puede llegar a necesitar cámara con atmósfera protegida para prevenir la contaminación del material fundido. Por otro lado, en comparación con las técnicas que usan láseres, el arco eléctrico es una fuente de energía más eficiente para fundir el material, sobre todo en aleaciones metálicas reflectantes, como el aluminio, el cobre o el magnesio [Cunningham, 2018].

En términos generales, la comparación de las principales características de las tecnologías de lecho de polvo y tecnologías DED se pueden observar en la Tabla II-2.

Tabla II-2. Comparativa de los procesos de fabricación aditiva metálica

	PBF [Bhavar, 2014]	**DED-LMD [Kittel, 2020]**	**DED-EBAM [SCIAKY, 2021]**	**DED-WAAM [Tabernero, 2018], [Chen, 2015]**
Precisión	Alta: ±0,05-0,2 mm	Media: ±0,2 mm	Necesidad de mecanizado final	Necesidad de mecanizado final
Integridad estructural	Alta: Cámara vacío/atmósfera protegida	Alta: Atmósfera protegida	Alta: Cámara vacío	Alta: Atmósfera protegida
Productividad [Pragana, 2021], [Gisario, 2019]	Baja: ~ 0,1-0,2 kg/h	Media: ~0,5-1 kg/h	Alta: ~3-11 kg/h	Alta: ~ 10kg/h
Tamaño de pieza	Limitado por el espacio de trabajo (max. 800 x 400 x 500 mm) [GE Additive, 2021-a]	Grande, limitado por el alcance de la máquina	Grande, limitado por el alcance de la máquina	Grande, limitado por el alcance de la máquina.
Complejidad geométrica	Alta	Media	Baja-Media	Baja-Media
Aplicación industrial	Fabricación directa de piezas complejas	Reparación de piezas, recubrimientos, fabricación directa de piezas	Reparación de piezas, recubrimientos, fabricación directa de piezas	Reparación de piezas, recubrimientos, fabricación directa de piezas
Precio equipamiento	Alto	Alto	Alto	Bajo
Coste materia prima	Muy Alto	Alto	Bajo	Bajo

Por lo tanto, al examinar las posibilidades y limitaciones de estos métodos (ver Tabla II-2), se concluye que los procesos aditivos para la fabricación de metales tienen muchos desafíos que superar en el futuro cercano. Por ejemplo, se deben de controlar las variables del proceso, como el tiempo y la temperatura del proceso de enfriamiento, la composición de la atmósfera protectora y la velocidad de solidificación del material.

De hecho, a consecuencia de estas variables se obtienen unas propiedades finales de la pieza dadas, como la microestructura, el acabado superficial, la resistencia mecánica o la resistencia a fatiga. Además, deben considerarse los efectos de un control deficiente de estas variables como la aparición de defectos en forma de porosidad, tensiones residuales excesivas, la mala adherencia al material base o la pérdida de propiedades mecánicas [Sames, 2016].

Por otro lado, hoy en día, aun en muchos casos, las tecnologías aditivas metálicas se limitan a la fabricación de prototipos, a la producción de pequeñas piezas de alto valor añadido y a las reparaciones [Dilberoglu, 2017]. Para reemplazar a los métodos tradicionales de fabricación y convertirse en un elemento básico de la Industria 4.0, estas tecnologías deberán de demostrar que pueden superar las barreras que tienen y adaptarse a la producción en masa.

3 Tecnología WAAM

3.1 Introducción

Hoy en día, la tecnología de aporte por arco eléctrico e hilo (*Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM*) se ha convertido en un proceso de fabricación interesante gracias a la posibilidad de fabricar piezas metálicas de gran tamaño y complejidad geométrica media con un coste reducido [Cunningham, 2018]. Esta tecnología se clasifica dentro de las tecnologías de fabricación aditiva metálica en el grupo de las tecnologías de deposición de energía dirigida (DED).

El origen de esta tecnología data del año 1925 cuando Baker [Baker, 1925] propuso usar un arco eléctrico como fuente de energía para fundir material en forma de hilo con el fin de fabricar artículos decorativos. Desde entonces la tecnología ha evolucionado, sobre todo en los últimos quince años hasta ser lo que hoy conocemos como WAAM [Derekar, 2018]. Hoy en día, la tecnología WAAM se ha convertido en un proceso de fabricación interesante para fabricar piezas *Near Net Shape* con un tamaño virtualmente ilimitado en una gran

variedad de materiales metálicos, como, aleaciones de titanio, aceros, aleaciones de níquel, aleaciones de aluminio… [Wu, 2018-b]

En relación a sus características, el proceso WAAM es similar a un proceso de soldadura automática [Williams, 2016-b]. El equipamiento necesario para esta tecnología está compuesto fundamentalmente por una fuente de soldadura, un sistema automático de alimentación de hilo, una antorcha, un sistema manipulador (basado en un robot antropomórfico o en una máquina cartesiana) y algunos accesorios, tales como, el sistema del gas de protección [Pan, 2018]. Básicamente, en este proceso la fuente de soldadura funde el hilo mediante un arco eléctrico y lo va aportando encima del sustrato capa a capa obteniendo la preforma deseada gracias al sistema manipulador.

Durante el proceso, para evitar la contaminación a causa de los gases de la atmósfera, y tratar de reducir la aparición de óxidos, nitratos u otras impurezas, se protege el baño fundido con un gas de protección con un caudal adecuado. Si el caudal de gas es demasiado alto, el exceso de gas puede provocar porosidad y poca penetración a causa de las turbulencias creadas en el baño fundido. Además, la composición de este gas es importante ya que influye en la trasferencia de calor [Cunningham, 2018]. Rodrigues et al. [Rodrigues, 2019-b] han resumido diferentes estudios que analizan el efecto de los diferentes tipos de gases de protección y diferentes caudales concluyendo que estos parámetros afectan sobre todo a las propiedades mecánicas y a la apariencia geométrica de las paredes fabricadas. Este estudio, junto con otros citados a lo largo de este trabajo, incide en la importancia de la selección de los parámetros y el impacto final de los mismos en el proceso.

El gran avance de la fabricación aditiva vendrá por la sustitución o la combinación con los métodos de fabricación establecidos y que ya se utilizan ampliamente en la industria manufacturera, como el mecanizado, la forja, la fundición y la soldadura. En este caso, el impacto de la fabricación aditiva en metal será mucho mayor, ya que hay margen para una amplia adopción en segmentos de mercado más amplios.

Este avance sólo será posible si los sistemas comerciales de FA tienen un coste de fabricación de los componentes mucho menor, tasas de aporte más altos y volúmenes de fabricación más grandes. El coste de fabricación depende principalmente de dos factores, la productividad o la tasa de aporte y el ratio *buy-to-use* que indica la cantidad de material a eliminar después del proceso aditivo. Un estudio realizado por la universidad de Cranfield muestra la relación entre estos dos factores. Al incrementar la tasa de aporte se reduce el ratio

buy-to-use [Williams, 2016-a]. Por ello, en el proceso WAAM, este será un factor determinante.

3.2 Ventajas y desventajas

En comparación con las otras técnicas de fabricación aditiva la mayor ventaja de la tecnología WAAM es la alta tasa de aporte que obtiene (1-10 kg/h, dependiendo del material [Cunningham, 2018]), lo que implica que se pueden fabricar piezas de tamaño considerable. Aun así, para obtener grandes valores de tasa de aporte es necesario introducir velocidades de alimentación de hilo grandes lo que crea una inestabilidad en el proceso con la subsecuente rugosidad en la superficie. Por ello, en general, se dice que con el proceso convencional (no procesos mejorados, GMAW-HW, GMAW Tandem…) no se debe superar la tasa de aporte de 8 kg/h en aceros y 1 kg/h en aleaciones de titanio y aluminio, [Williams, 2016-b], ya que si no, se necesitarían largos postprocesos de mecanizado.

Hay otras ventajas reseñables del aporte mediante arco:

- Integridad muy alta del material aportado, sin defectos y con buenas propiedades mecánicas [Cunningham, 2018] [Sames, 2016].

- Relativamente bajo costo de materia prima y alta calidad de ésta, con propiedades certificadas y con una amplia disponibilidad de materiales [Sames, 2016]. En concreto, el precio por kilogramo de material en forma de hilo en materiales de ingeniería como el titanio, acero y aleaciones de níquel es más bajo que en forma de polvo [Cunningham, 2018]. Por ejemplo, en promedio, el polvo de titanio 6AI-4V de grado AM es aproximadamente un 141% más caro que el costo medio del hilo de la misma aleación. Por otro lado, el polvo de tantalio de grado AM es un 7% más caro que el coste medio del hilo de tantalio. Las diferencias en otros materiales son más importantes como, por ejemplo, en el polvo de Inconel 625 de grado FA como en el polvo de acero inoxidable 316 de grado FA, los cuales son el doble de caros que sus contrapartes en forma de hilo [SCIAKY, 2021]. Además, también se reduce la necesidad de sistemas de reciclado de polvos y se dejan de lado los aspectos relacionados con la salud y la seguridad relacionados con la utilización de este formato de material.

- Por otro lado, el coste del equipamiento es relativamente reducido, es decir, no es necesario una inversión de capital alto y la variedad de suministradores de estos equipos es elevado, dado que se pueden

obtener fácilmente a través de cualquier suministrador de equipamiento para soldadura. En cambio, en otras tecnologías AM como el EBM, se necesita una cámara de vacío lo que incrementa mucho el precio del equipamiento [Cunningham, 2018]. Además, el coste de mantenimiento es bajo, debido a que el equipamiento no incluye componentes sensibles como las ópticas de los láseres.

- Con altas tasas de aporte el tiempo de producción es corto [Pan, 2018]. Comparando con técnicas sustractivas tradicionales estos sistemas pueden reducir el tiempo de producción un 40-60% y el tiempo de postproceso un 15-20% dependiendo del tamaño de la pieza [Wu, 2018-b].

- La tecnología WAAM permite obtener piezas de geometría cuasi final (considerándose un proceso Near Net Shape) con una tasa de aprovechamiento de la materia prima muy elevada. Sin embargo, se trata de una tecnología que casi siempre necesita una etapa de mecanizado para su acabado final, en la cual se mejora la precisión geométrica y el acabado superficial del material aportado. Aun así, la utilización del material es muy efectiva por encima de 90% [Liberini, 2017] y por encima del 75% si se incluye el mecanizado de acabado. Por ejemplo, recientemente se han fabricado los ensamblajes de un tren de aterrizaje de una aeronave mediante WAAM reduciendo la cantidad de materia prima utilizada en un 78% comparado con técnicas sustractivas tradicionales [Williams, 2016-b].

- Además, la eficiencia energética de los procesos de aporte por arco es mucho mayor (90%) que el de su competencia (el láser o el haz de electrones) [Liberini, 2017]. Frente a las tecnologías convencionales, la tecnología aditiva aporta y procesa el material mínimo, permitiendo un ahorro sustancial de materiales y energía.

- Por último, el proceso WAAM no genera un gran impacto medioambiental [Wu, 2018-b], principalmente porque, como se ha comentado anteriormente, energéticamente es muy eficaz. En segundo lugar, porque el proceso WAAM hace un uso muy eficiente del material.

Sin embargo, aunque todas las ventajas expuestas previamente son prometedoras, esta tecnología todavía tiene muchos retos que superar. Una de las principales barreras en el uso de WAAM es la necesidad de realizar

operaciones de acabado en las piezas que se han construido capa a capa. El proceso WAAM es solo una etapa de fabricación, la mayoría de las piezas requieren otras etapas de postprocesados, ya sea mecanizado, pulido, tratamientos térmicos, etc. La rugosidad, la porosidad, la microestructura y las tensiones residuales obtenidas son diferentes para cada tipo de proceso WAAM y material utilizado. Por lo tanto, cada aplicación puede requerir un tipo diferente de postprocesado.

En primer lugar, la precisión geométrica del proceso no es excelente (las paredes más delgadas fabricables están entre 2,5-3 mm) y además los acabados superficiales obtenidos no son aceptables para algunas aplicaciones [Horgar, 2018]. Por ejemplo, con alturas típicas de capa de 1-2 mm, el acabado superficial típico es de Ra=500 µm [Williams, 2016-b], siendo este último un factor determinante y restrictivo para la utilización de esta tecnología en piezas de tamaño muy pequeño. Para resolver la baja calidad superficial que se obtiene y respetar las tolerancias geométricas de la pieza, casi siempre se contempla llevar a cabo un postprocesado de mecanizado final.

En segundo lugar, además del mecanizado final, también hay que mencionar los tratamientos térmicos posteriores que se deben de aplicar a las piezas fabricadas mediante WAAM, debido a que en este proceso la adición capa a capa usando arco eléctrico crea ciclos térmicos en el metal solidificado, como en el sustrato. En concreto, este suministro de calor provoca un fundido parcial y un tratamiento térmico en las capas anteriores [Derekar, 2018]. A causa de ello, estas piezas sufren gran estrés térmico, y por lo tanto, se generan grandes tensiones residuales, que hay que liberar mediante tratamientos térmicos. En algunos estudios, aparte de tratamientos térmicos se ha utilizado enfriamiento forzado o libre entre capas para dar solución a este problema [Pan, 2018]. Por ejemplo, está bien documentado que los tratamientos térmicos mejoran la microestructura y las propiedades mecánicas en Inconel 718 y en Ti6Al4V [Dhinakaran, 2020]. Además, en Ti6Al4V, Martina et al. [Martina, 2015-b] han reportado que, aplicando laminación superficial, se puede obtener un refinamiento del grano y se puede modificar la microestructura desde fuertemente columnar a equiaxial.

Por último, las piezas que se fabrican mediante WAAM, si no se eligen los parámetros de proceso adecuados, pueden presentar defectos internos o externos tales como, poros, faltas de llenado, acabados no adecuados y grietas [Geng, 2017], [Xiong, 2018]. Además, los sistemas CAD para esta tecnología están aún muy inmaduros y la monitorización y el control del proceso es escaso [Pan, 2018].

Por todo ello, hay que tener en cuenta que otros procesos de fabricación aditiva han recibido más atención en los últimos años. Aunque el proceso WAAM tenga gran potencial con vistas a futuro, aún hay diversos aspectos a desarrollar para poder dar una solución completa de esta tecnología desde el diseño inicial hasta la verificación final de la calidad de las piezas.

Tanto para reducir las distorsiones térmicas como para mantener aceptables acabados superficiales y tolerancias geométricas los parámetros seleccionados para cada material son fundamentales [Horgar, 2018]. Las características del cordón aportado, como, la geometría del cordón, la penetración, la profundidad de la zona térmicamente afectada, etc. también son dependientes de los parámetros de proceso. Entre ellas las principales son: la velocidad de alimentación de hilo (*Wire Feed Rate, WFR*), el suministro térmico (*Heat Input, HI*), el diámetro del hilo, la velocidad de avance (*Travel Speed, TS*), la forma del arco, el Stick-out (distancia que sale el hilo de la boquilla de la antorcha de soldadura), la composición y el caudal del gas de protección y la estrategia de aporte [Nagesh, 2002].

3.3 Tipos de tecnologías WAAM

Dependiendo de la naturaleza de la fuente de soldadura se distinguen tres tipos de procesos WAAM: 1) WAAM basado en *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) [Horgar, 2018], 2) WAAM basado en *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) [Qi, 2018] y 3) WAAM basado en *Plasma Arc Welding* (PAW) [Jia, 2020]. Los procesos GMAW (Figura II-4 c.1), GTAW (Figura II-4 c.2) y PAW (Figura II-4 c.3) son procesos de soldadura, cada una con sus características y aplicaciones propias. En estos procesos a medida que el material fundido mediante un arco eléctrico se aporta sobre el sustrato, se forman cordones de soldadura y superponiendo estos cordones capa a capa se fabrican piezas de múltiples geometrías [Veiga, 2020]. La elección del tipo de proceso de aporte depende del material y de la geometría a fabricar, siendo el proceso WAAM basado en PAW la opción más adecuada para fabricar piezas de titanio de medio tamaño debido a las altas propiedades obtenidas y al reducido riesgo de contaminación. Por otro lado, para piezas grandes que necesitan altas tasas de aporte, la tecnología WAAM basado en GMAW sería la opción más acertada en materiales como aceros y aluminios [Singh, 2020]. Por último, la tecnología WAAM basado en GTAW se utiliza para la fabricación de paredes delgadas de unos 3-5 mm.

3.3.1 Proceso WAAM basado en GTAW

Los procesos GTAW y PAW llevan un electrodo de tungsteno no consumible y un sistema de alimentación de hilo no coaxial que se debe de orientar para asegurar la calidad óptima del material aportado [Wu, 2018-b]. Esto es un inconveniente, ya que la programación de la fabricación de las diferentes piezas se complica en exceso [Singh, 2020].

En el proceso GTAW, como se observa en la Figura II-4 c.2 el arco se crea entre el electrodo y el sustrato o la pieza y se protege el baño fundido mediante un gas de protección inerte, generalmente argón o helio, generando una atmósfera de protección alrededor del material fundido [Wu, 2018-a]. En esta tecnología no se obtienen salpicaduras y es adecuado para generar piezas con paredes delgadas.

3.3.2 Proceso WAAM basado en PAW

En el proceso PAW como se observa en la Figura II-4 c.3, a diferencia del proceso GTAW, se utilizan dos gases, un gas plasmático que envuelve el electrodo de tungsteno que está dentro del cuerpo de la antorcha y un gas protector que protege el baño fundido. Estos dos gases van por conductos separados y gracias al arco eléctrico se fuerza la ionización del gas plasmático. De esta manera, el plasma es forzado a través de la boquilla de la antorcha y contrae el arco eléctrico, dirigiendo al sustrato un chorro concentrado que puede alcanzar temperaturas muy elevadas.

Tanto la densidad energética como las temperaturas obtenidas en este proceso son mucho más elevadas que en el proceso GTAW y la zona afectada térmicamente es mucho menor. De esta manera, la tecnología PAW hace posible obtener cordones de alta calidad con menor distorsión ya que es un proceso de alta estabilidad [Singh, 2020].

El aporte por arco de plasma ofrece las mejores propiedades mecánicas sobre todo en aleaciones aeronáuticas como el titanio [Artaza, 2020-b]. Por ejemplo, Artaza et al. [Artaza, 2019] han comparado las propiedades mecánicas de piezas fabricadas mediante procesos WAAM basados en GMAW y PAW en acero Mn4Ni2CrMo. Su estudio ha mostrado que con ambas tecnologías se logran valores mecánicos más altos que los estándares de forja análogos pero que con el proceso PAW son ligeramente más elevados que con el GMAW.

3.3.3 Proceso WAAM basado en GMAW

En el proceso GMAW el propio hilo es el electrodo consumible y se alimenta de forma coaxial como se observa en la Figura II-5. En este proceso se forma el

arco eléctrico entre el electrodo y la pieza y de esta manera se funde el hilo (electrodo) y se va aportando donde se decida capa a capa. El baño fundido está protegido con un gas de protección que puede ser activo o inerte. Dependiendo de la naturaleza de este gas se diferencia entre los procesos MAG (*Metal Active Gas*) y MIG (*Metal Inert Gas*).

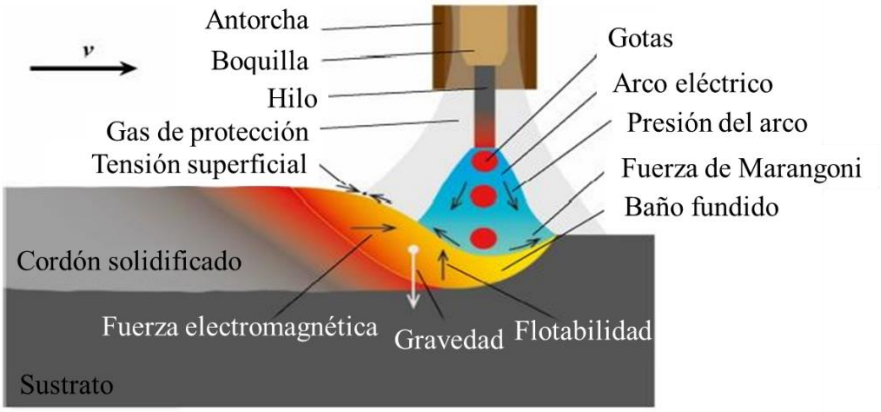


Figura II-5. Representación gráfica del proceso GMAW (adaptado de [Hu, 2021])

En el siguiente apartado se revisará en profundidad el proceso WAAM basado en GMAW, pero como resumen considerando la naturaleza del proceso WAAM y teniendo en cuenta que debe ser económicamente competitivo para la fabricación de piezas de tamaño medio y grande, la ventaja más importante del proceso GMAW es la alta tasa de aporte obtenida en comparación con el resto de las tecnologías aditivas.

4 Proceso WAAM basado en GMAW

4.1 Proceso de trasferencia de material y modos de trabajo

Como ya se ha mencionado, en la tecnología GMAW se forma un arco eléctrico entre el electrodo en forma de hilo y la pieza. De esta manera, las gotas de líquido se transfieren desde el electrodo (el hilo) al baño fundido. Esta trasferencia se puede hacer mediante diferentes procesos, tales como, spray, globular y/o corto circuito [Kim, 1993] [Ferraresi, 2003] [Scotti, 2014]. En la Figura II-6 se pueden ver los principales procesos de trasferencia de material.

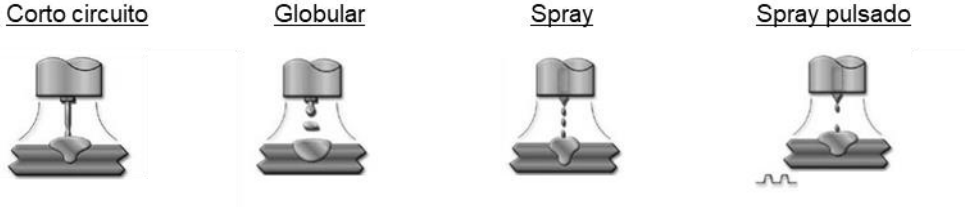


Figura II-6. Principales procesos de trasferencia de material

Por ejemplo, el proceso de trasferencia de cortocircuito es un proceso con bajo suministro térmico que trasfiere el material cuando el electrodo es reducido eléctricamente, es decir, cuando hay contacto físico entre el electrodo y el sustrato o el baño fundido. Este suministro térmico reducido lo hace muy adecuado para la soldadura de chapas finas o soldadura posicional [Scotti, 2012].

En la trasferencia globular, por su parte, el material se trasfiere en grandes gotas irregulares gracias a la gravedad. Estas gotas tienen mayor diámetro que el electrodo y por ello su aporte puede ser un tanto errático, generando salpicaduras y posibles faltas de llenado [Nassan, 2003].

La trasferencia en spray es un proceso de alta energía donde se trasfiere el material mediante un chorro de pequeñas gotas fundidas y uniformes. Las gotas son impulsadas axialmente a través del arco obteniendo altas tasas de aporte. Por último, la trasferencia en spray pulsado es una variante de la trasferencia en spray altamente controlado. Para conseguir este tipo de trasferencias, la señal de intensidad debe ser pulsada, la cual va fluctuando desde un valor base a un valor máximo. De esta manera, en cada pulso de esta señal se trasfiere una gota controlada de material desde el electrodo al baño fundido [Wu, 2004]. Así, se eliminan las salpicaduras y los defectos por faltas de llenado o fusiones incompletas que son comunes en los procesos de trasferencia globular y corto circuito [Dos Santos, 2017] [Zheng, 2021].

Relacionado con esto, durante las últimas décadas, se utilizan fuentes de soldadura con estrategias de control de alta frecuencia para controlar esta transferencia del material. Estas estrategias de control impuestas por cada modo de trabajo (cada fuente de soldadura podrá tener sus propios modos de trabajo) definen la forma de la señal de intensidad aplicada a la materia prima. La forma de la señal de intensidad puede influir en la dinámica del baño fundido y en el suministro de calor, factores clave para obtener microestructuras específicas y evitar posibles defectos metalúrgicos. De esta manera, a los fuentes de soldadura que tienen estos tipos de controles se les llaman equipos sinérgicos [Subramaniam, 1999].

Por lo tanto, las señales de intensidad que se aplican en el hilo a fundir están definidas por los fabricantes de las fuentes de soldadura creando modos de trabajo, como CMT (*Cold Metal Transfer*) o Cold Arc, Pulse, etc. [Selvi, 2018] [Kah, 2013]. En concreto, las fuentes de soldadura de la compañía EWM [EWM, 2021], que se utilizarán en esta tesis, implementan cinco modos de

trabajo principales: GMAW estándar, GMAW pulsado, Cold Arc, Force Arc y AC pulsado, cada una con sus características.

4.1.1 GMAW estándar y GMAW pulsado

El modo de trabajo GMAW estándar permite altas tasas de aporte y trabaja en modos de trasferencia de material entre globular y spray. En cambio, el modo GMAW pulsado transfiere en cada pulso una gota de material fundido de forma controlada con altas tasas de aporte.

La transferencia de energía en el modo GMAW pulsado es menor que en el modo GMAW estándar y, a su vez, el suministro de calor también se reduce [Dos Santos, 2017] [Liang, 2018]. De esta manera, Luo et al. [Luo, 2018] han estudiado procesos WAAM de arco pulsado y arco no pulsado, concluyendo que la eficiencia de fabricación y el control del proceso es mayor en los procesos WAAM de arco pulsado. Además, el proceso pulsado genera menos humos de soldadura, menos salpicaduras y menos faltas de llenado [Kah, 2013].

4.1.2 Cold Arc

El modo Cold Arc, diseñado y presentado por la empresa EWM en 2004, transfiere el material de manera controlada mediante procesos de corto circuito. Este proceso es posible gracias a un control digital muy rápido de la señal de intensidad y a un tipo de conmutación de inversores altamente dinámica.

El procesador de la señal es utilizado para controlar la extracción instantánea de energía justo antes del reencendido del arco, es decir, después del cortocircuito, bajando la intensidad de pico dramáticamente en ese instante. En la Figura II-7, se puede apreciar la comparación de la señal Cold Arc con la señal convencional de cortocircuito. Las primeras dos fases son iguales en los dos casos, el arco está encendido y el material fundido del electrodo se acerca hacia el baño fundido. Cuando el electrodo toca la pieza, la tensión se desploma a casi un valor nulo y ocurre el corto circuito mientras que la intensidad aumenta bruscamente. Entonces la intensidad se reduce drásticamente para permitir una rotura suave del puente del metal fundido, evitando salpicaduras. Inmediatamente después, el arco se enciende. Una vez estabilizado el arco, la intensidad es elevada ligeramente durante un período de tiempo corto, para crear una separación regular. Además, este periodo crea un cono de fusión en la punta del electrodo garantizando una continuidad suave del proceso [Kah, 2013].

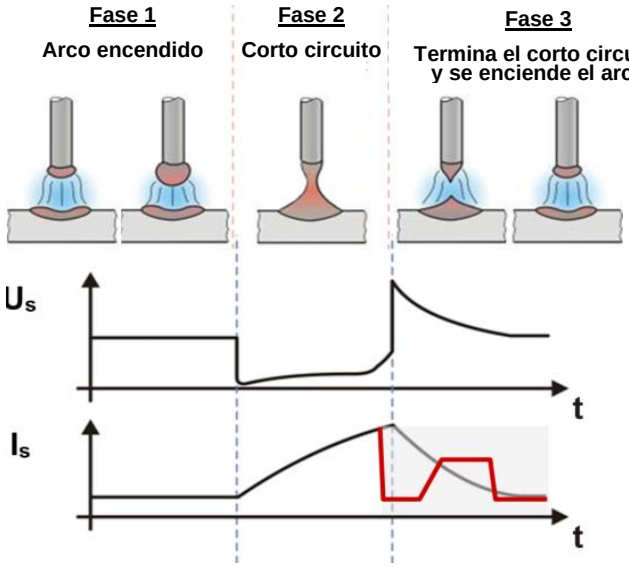


Figura II-7. Proceso y forma de la señal de intensidad y tensión en el modo de trabajo Cold Arc (adaptado de [EWM, 2021])

La empresa Fronius [Fronius, 2021], por su parte, desarrolló un método similar al ya nombrado, el modo de trabajo CMT, que se ha investigado activamente para WAAM sobre todo en aleaciones de aluminio [Zhang, 2019]. El proceso de soldadura CMT también utiliza el modo de trasferencia de cortocircuito [Selvi, 2018]. Este sistema está equipado con un control digital de alta velocidad, inversores y procesadores que controlan el proceso controlando la longitud del arco, la intensidad y la tensión. El CMT controla la transferencia de material mediante métodos asistidos eléctricamente incidiendo en la iniciación y la duración del corto circuito y mediante métodos asistidos mecánicamente como se observa en la Figura II-8.

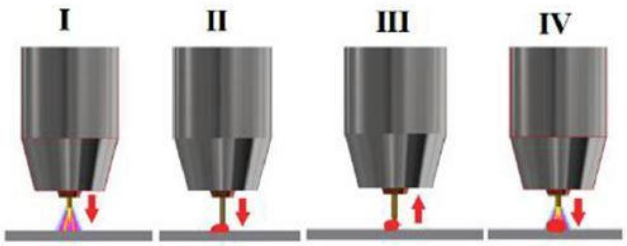


Figura II-8. Fases principales del control de alimentación de hilo en el proceso CMT [Prado-Cerqueira, 2017]

En resumen, en los modos Cold Arc y CMT se minimizan las proyecciones y el suministro de calor en comparación con los modos de trabajo GMAW convencionales (pulsado o estándar) [Shukla, 2020]. Aun así, este proceso está limitado a bajas tasas de aporte (en aceros 2-3 kg/h, CMT hasta 10 kg/h) debido a su bajo suministro de calor y su pequeño baño fundido [Tabernero, 2018].

Por ejemplo, Panchenko et al. [Panchenko, 2020] han utilizado el modo Cold Arc en lugar de un proceso GMAW autorregulado para reducir el suministro de calor en un 16%. Esta reducción del calor ha mejorado la eficiencia del aporte y ha reducido la penetración. De esta manera, se pueden fabricar paredes de espesores reducidos con menores tasas de aporte ya que el suministro térmico generado en la pieza es reducido. Finalmente, Derekar et al. [Derekar, 2020] han comparado los modos de trabajo GMAW pulsado y CMT en aluminio 5183 concluyendo que el modo GMAW pulsado tenía niveles de porosidad más altos.

4.1.3 Force Arc

En tercer lugar, el modo Force Arc se utiliza para tasas de aporte altas con arco voltaico de gran presión. De esta manera, se obtiene alta estabilidad direccional y la penetración suele ser profunda y concentrada [EWM, 2021]. Es un proceso adecuado para las soldaduras de raíces ya que la penetración obtenida es elevada y segura. Además, en soldaduras en ángulo con esta tecnología se obtiene el máximo grosor de costura.

4.1.4 AC pulsado

Por último, en el proceso AC pulsado la señal de intensidad tiene polaridad variable con altas tasas de aporte. Como se observa en la Figura II-9, en la fase positiva se forma la gota (zona 1), en la zona 2 se desprende la gota, en la zona 3 se llega a la intensidad de base y en la fase negativa (zona 4) se precalienta y limpia el hilo a aportar. Este proceso obtiene soldaduras limpias sin huellas de quemado en chapas finas, incluso en aleaciones de AlMg. Específicamente, aunque la capacidad de soldadura de las aleaciones de aluminio sea limitada, el proceso AC pulsado especialmente es adecuado para este tipo de soldaduras.

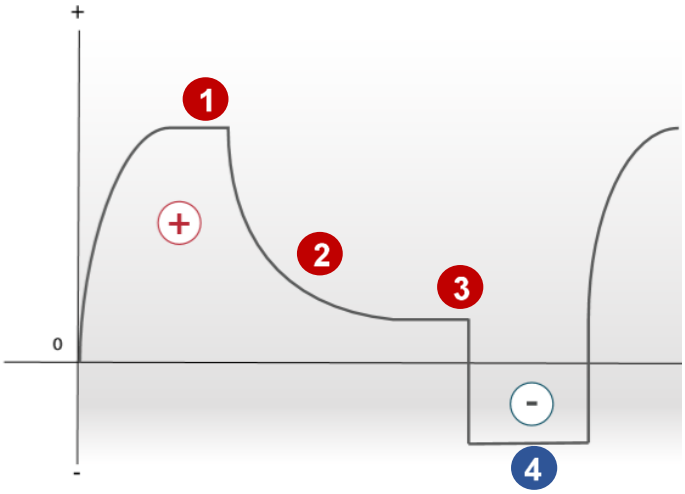


Figura II-9. Proceso y forma de la señal de intensidad en el modo de trabajo AC pulsado [EWM, 2021]

Aun así, utilizar señales de intensidad con polaridad variable no es nada nuevo, pero el uso de este tipo de señales en procesos con altas tasas de aporte es un desarrollo novedoso. En algunos estudios previos se ha analizado la influencia de las técnicas avanzadas de CMT con polaridad variable, conocidas como CMT avanzada (CMT-ADV) y CMT avanzada pulsada (CMT-PADV), sobre todo para la soldadura de aleaciones de aluminio [Cong, 2017], [Zhang, 2018-a], [Gu, 2014]. Sin embargo, en estos estudios la técnica CMT se utiliza con tasas de aporte relativamente bajas. Por el contrario, en esta tesis se estudia la técnica AC pulsado con altas tasas, convirtiéndola en la última novedad en soldadura de aluminio aplicada a la tecnología WAAM.

Por ejemplo, Gu et al. [Gu, 2014] han demostrado que el proceso CMT-PADV es una forma eficaz de reducir los niveles de porosidad, concluyendo que las señales con polaridad variable son adecuadas para la fabricación de piezas de aluminio. Además, los valores de resistencia y deformación plástica obtenidas han sido excelentes. Aun así, la tasa de aporte ha sido en este caso bastante baja: 1,08 kg/h. Además, Zhang et al. [Zhang, 2020-b] y Scotti et al. [Scotti, 2020] también han estudiado la relación de polaridad positiva/negativa en el proceso CMT-PADV, que es la relación entre los instantes de polaridad positiva y negativa en la señal de intensidad.

4.2 Ventajas y desventajas

Como ya se ha mencionado anteriormente, teniendo en cuenta que la tecnología WAAM debe de ser económicamente competitiva para la fabricación de piezas de tamaño medio y grande, la tecnología WAAM basada en GMAW es una gran opción ya que la tasa de aporte obtenida en comparación con otras tecnologías de fabricación aditiva es superior. La tasa de aporte es

dependiente del modo de trabajo. Los modos GMAW pulsado, AC pulsado y Force Arc obtienen altas tasas de aporte; en cambio, Cold Arc obtiene tasas inferiores. Por ejemplo, para aceros, se pueden llegar a obtener tasas de 10 kg/h, lo que es 16 veces mayor que las obtenidas con procesos basados en material en forma de polvo, SLM con una tasa de 0,6 kg/h o LMD con una tasa de 1 kg/h [Tabernero, 2018]. En general, dependiendo del material y los parámetros del proceso, las tasas de aporte de la tecnología GMAW están entre 1-10 kg/h [Cunningham, 2018] [Williams, 2016-b], que es 2-3 veces mayor que las obtenidas con los procesos WAAM basados en GTAW y PAW.

Además, los equipos necesarios para el proceso WAAM basado en GMAW son relativamente económicos y se pueden utilizar en una amplia gama de metales. Por ejemplo, es un proceso muy adecuado para el aporte de aceros y aleaciones de aluminio. También mencionar que es un proceso fácil de automatizar y a diferencia de los procesos PAW y GTAW no se tiene que orientar la antorcha para aportar el material lo que permite gran libertad de diseño. Por último, el límite de tamaño en el set-up es muy elevado, ya que se puede instalar la tecnología tanto en máquinas Gantry como robots antropomórficos como se verá posteriormente.

Sin embargo, el proceso GMAW es menos estable y crea más humos de soldadura que los procesos GTAW y PAW ya que la corriente eléctrica actúa directamente en la materia prima [Wu, 2018-b]. Además, esta característica puede provocar salpicaduras y un calentamiento excesivo, lo que empeorará las propiedades mecánicas de los materiales aportados.

Además, para obtener altas tasas de aporte, es necesario introducir altas velocidades de alimentación de hilo, lo que puede crear una inestabilidad en el proceso, con la subsecuente ondulación en la superficie. Por ello, se deben de controlar los valores de alimentación de hilo para conseguir valores aceptables de acabado superficial y mantener la tolerancia requerida en las piezas aportadas [Williams, 2016-b]. No obstante, después de realizar el aporte por GMAW, el mecanizado final casi siempre será necesario para lograr las tolerancias geométricas requeridas.

4.3 Parámetros principales del proceso WAAM basado en GMAW

Una vez elegidos la composición del hilo a aportar y la composición del gas de protección, entre los parámetros principales de esta tecnología aparecen:

- Diámetro del hilo alimentado
- Caudal del gas de protección
- Modo de trabajo

- Velocidad de alimentación de hilo (*Wire Feed Rate, WFR*)
- Velocidad de avance (*Travel Speed, TS)*
- Stick-out
- Estrategia de aporte
- Suministro térmico (*Heat Input, HI*)

En primer lugar, se tendrá que determinar el diámetro del hilo que se va a alimentar al proceso. Este diámetro normalmente suele ser de 0,8-1,6 mm. Además, dependiendo del material elegido también se tendrá que elegir la composición del gas de protección más adecuado y el caudal al que se suministrará el mismo. Para un aporte adecuada dependiendo del tipo de gas y material a aportar los caudales utilizados suelen ser de 12-30 l/min.

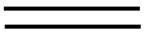
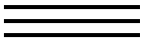
Una vez determinados estos parámetros, se elegirá el modo de trabajo deseado (resumidos en el apartado 4.1) y se establecerá la velocidad de alimentación de hilo (WFR). Dependiendo de estos dos valores la fuente de soldadura crea señales de intensidad con una forma de onda concreta que se introducen en el hilo alimentado. Además, otro parámetro importante del proceso WAAM es la velocidad de avance (TS) de la máquina en la que está instalado el sistema WAAM.

Por otro lado, el Stick-out (distancia que sale el hilo de la boquilla de la antorcha de soldadura) también es un parámetro que habrá que determinar y que influirá en la intensidad introducida en el hilo durante el proceso. Por último, otro de los principales parámetros a elegir en el proceso WAAM será la estrategia de aporte analizada más en profundidad en el siguiente apartado. De esta manera, el suministro térmico quedará determinado por la energía introducida y la estrategia de aporte elegida (revisado en detalle en el apartado 4.5) [Nagesh, 2002].

4.4 Estrategias de aporte

Con el objetivo de mejorar la productividad y la precisión geométrica del proceso WAAM basada en GMAW, varios trabajos proponen utilizar diferentes estrategias de aporte, como, por ejemplo, la estrategia de solape, la estrategia de oscilación o la estrategia matricial. La estrategia solapada es aquella que solapa cordones rectos unos con otros para cubrir de material el área deseada. En la estrategia de oscilación, por su parte, para cubrir esa área la máquina va realizando una estrategia de oscilación o *weaving*. Las paredes fabricadas mediante solape como por oscilación se nombran como se recoge en la Tabla II-3.

Tabla II-3. Resumen de la nomenclatura utilizada para la definición de las diferentes paredes fabricadas mediante diferentes estrategias

Tipo de pared	Definición	Representación
Pared simple	Un único cordón en cada capa	
Pared solapada doble	Dos cordones solapados en cada capa	
Pared solapada triple	Tres cordones solapados en cada capa	
Pared oscilada simple	Un único cordón oscilado en cada capa	

Por último, en la estrategia matricial en vez de fabricar una única pieza se fabrican varias piezas simultáneamente, es decir, después de aportar una capa de la primera pieza se va a aportar la misma capa de la siguiente pieza y así sucesivamente.

Por ejemplo, Ma et al. [Ma, 2019] han llevado a cabo un estudio exhaustivo sobre la estrategia oscilatoria para la fabricación de grandes estructuras metálicas y de paredes delgadas en aleaciones de aluminio. El objetivo de este estudio ha sido utilizar la estrategia oscilatoria para mejorar la planitud de la superficie superior, concluyendo que es un sistema eficaz. Caballero et al. [Caballero, 2019] han llevado a cabo un estudio para determinar el efecto de diferentes variables del proceso WAAM, como el gas protector, la estrategia de aporte (cordón simple, oscilación y cordones solapados) y los tratamientos térmicos posteriores sobre la microestructura y las propiedades mecánicas del acero inoxidable 17-4 PH aportado. Por otro lado, Xu et al. [Xu, 2019] han comparado el solape paralelo, la oscilación triangular y la oscilación cuadrada en aceros martensíticos. Por último, Dirisu et al. [Dirisu, 2019] han comparado las propiedades de resistencia y tenacidad a la fractura obtenidas en componentes de acero fabricadas mediante estrategias oscilatorias y de un único cordón. Toda esta investigación hasta hoy en día se ha realizado en modos de trabajo GMAW de baja tasa de aporte. Por lo tanto, aún no se ha estudiado la influencia de la estrategia de oscilación en los procesos de alta tasa de aporte.

4.5 Suministro térmico durante el proceso de aporte de material

Dentro del estudio de la tecnología WAAM otro aspecto que no ha recibido toda la atención que se merece es el suministro de calor. Durante el proceso WAAM, los múltiples ciclos de fusión y solidificación crean una propagación de calor no uniforme en los componentes fabricados. Esta propagación y acumulación de calor no lineal determinará la morfología, microestructura y las propiedades mecánicas de los componentes obtenidos [Wu, 2018-b]. Por

ejemplo, Li et al. [Li, 2020-a] han demostrado que el suministro térmico afecta a la microestructura y las propiedades mecánicas de los componentes fabricados en la aleación de aluminio Al-7Si-0,6Mg. Del mismo modo, se han logrado los mismos resultados modificando la velocidad de alimentación de hilo y la velocidad de avance en probetas fabricadas mediante WAAM en Al-Mg por Su et al. [Su, 2019]. En Ti6Al4V, Wu et al. [Wu, 2018-a] han indicado que la acumulación de calor afecta a la forma geométrica de las piezas obtenidas. Además, se ha demostrado que el suministro térmico también afecta a la formación de defectos internos, a la tensión residual, a la distorsión y a las transformaciones de fase [Oliveira, 2020]. Por lo tanto, es evidente la necesidad de sistemas de monitorización y control de la temperatura durante el proceso WAAM.

En consecuencia, como la cantidad de calor suministrada en el proceso WAAM basado en GMAW es alta, se requiere la inserción de tiempos de enfriamiento entre el aporte de capas para enfriar el componente, evitar su colapso y minimizar los efectos de la acumulación de calor. Este tiempo de enfriamiento puede definirse como un intervalo de tiempo fijo o un tiempo vinculado a alcanzar una temperatura fija entre pasadas, hasta la cual el sistema esperará para aportar la siguiente capa [Montevecchi, 2018]. De esta forma, la temperatura entre pasadas es un parámetro que está íntimamente ligado con el suministro térmico. Derekar et al. [Derekar, 2019] han estudiado la influencia de la temperatura entre pasadas en la porosidad y las propiedades mecánicas obtenidas en componentes de aluminio. En este estudio, la estrategia de aporte también ha sido oscilatoria.

4.6 Procesos WAAM basado en GMAW mejorados

Como ya se ha mencionado, para que esta tecnología sea económicamente competitiva es necesario conseguir tasas de aporte lo más altas posibles. Con el proceso GMAW tradicional, como ya se ha mencionado, para obtener altas tasas de aporte, es necesario introducir altas velocidades de alimentación de hilo aumentando el suministro de calor, lo que puede crear una inestabilidad en el proceso y, en consecuencia, la tasa de aporte está limitada a un valor máximo insuperable. Por ello, se están llevando a cabo estudios que plantean cambios en el proceso para poder maximizar este valor. En este aspecto, se han desarrollado tres métodos principales: GMAW con dos electrodos tándem, GMAW/GTAW híbrido (introducción de un electrodo GTAW al proceso GMAW) y la adición de otro hilo caliente (*Hot wire, HW*).

4.6.1 Doble electrodo GMAW tándem

En la tecnología GMAW con dos electrodos tándem, se colocan dos electrodos en vez de una en una misma antorcha, aislados entre sí y alimentados de diferentes fuentes de soldadura, suministrando energía al material base simultáneamente, cambiando la distribución de calor que se obtiene con el proceso convencional GMAW de un solo hilo como se observa en la Figura II-10 [Fang, 2012]. En este tipo de procesos a causa de que se tienen dos arcos eléctricos se crea un solo baño fundido, mucho mayor comparado con el baño obtenido con un único GMAW con el mismo suministro de calor [Chen, 2015]. Gracias a ello, el proceso tándem es un proceso muy eficiente con alta tasa de aporte, mejora de la productividad y reducción de defectos, aumentando la calidad de los cordones de soldadura obtenidos [Yao, 2016]. Por ejemplo, Lee et al. [Lee, 2013] han comparado la tasa de aporte obtenida en aluminio con un solo hilo (5,52 kg/h) con el obtenido con el proceso tándem (8,7 kg/h), aumentando considerablemente para el mismo diámetro de hilo (1,6 mm). Por otro lado, Martina et al. [Martina, 2018] usando la técnica GMAW pulsado con una antorcha tándem en un acero inoxidable 17-4 PH han obtenido una tasa de aporte de 9,5 kg/h, lo que es considerablemente alto.

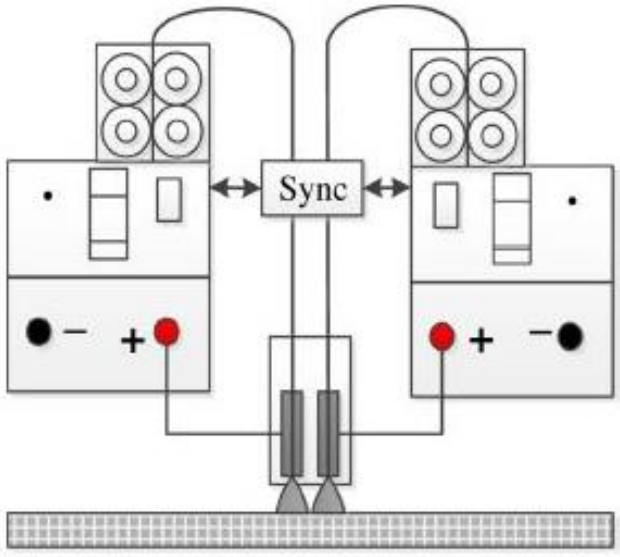


Figura II-10. Tecnología de dos electrodos GMAW tándem [Yao, 2016]

4.6.2 Proceso GMAW/GTAW híbrido

Para el propósito mencionado previamente también es posible añadir otro electrodo GTAW a la antorcha GMAW tradicional, creando una tecnología híbrida. Con esta tecnología se obtienen mayores tasas de aporte ya que la antorcha GTAW precalienta el material base y crea el baño fundido para luego pasar por ella la antorcha GMAW aportando la cantidad de material deseada

con un arco más estable [Sahasrabudhe, 2018-b]. Las interacciones entre las dos antorchas son fundamentales para definir el modo de trasferencia de material, la productividad y la calidad del proceso [Sahasrabudhe, 2018-a].

Dentro de esta idea se diferencian dos tecnologías. La primera es la tecnología de doble-electrodo que reduce el suministro de calor al metal base y mantiene constante la intensidad introduciendo una antorcha GTAW en *bypass* (Figura II-11). Por ejemplo, a la hora de aportar paredes delgadas con tecnología doble electrodo el coeficiente de utilización del material aumenta más del 10%, por lo que la eficiencia de aporte del material y la tasa de aporte aumentan comparando con técnicas tradicionales [Yang, 2016]. La segunda, en cambio, es la llamada GMAW/GTAW hibrida donde se añade una nueva antorcha GTAW con su propia fuente de soldadura para obtener una distribución del arco eléctrico óptimo [Chen, 2017].

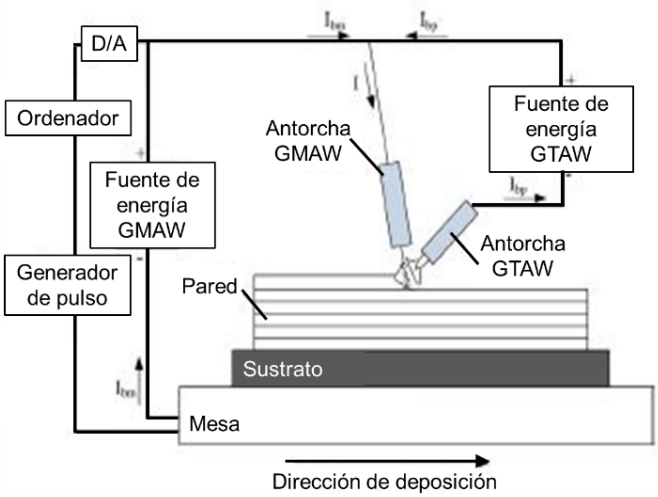


Figura II-11. Proceso híbrido GMAW/GTAW introduciendo la antorcha GTAW en bypass (adaptado de [Yang, 2016])

4.6.3 Proceso GMAW-HW

Por último, otra solución planteada es añadirle al proceso GMAW tradicional un hilo caliente adicional (GMAW-HW). Este hilo caliente es precalentado antes de introducirlo en el proceso gracias a la introducción de una corriente por ella (Figura II-12). Esta corriente es mucho menor que el que se introduce en el hilo principal y es insuficiente para crear un arco eléctrico entre el sustrato y el hilo.

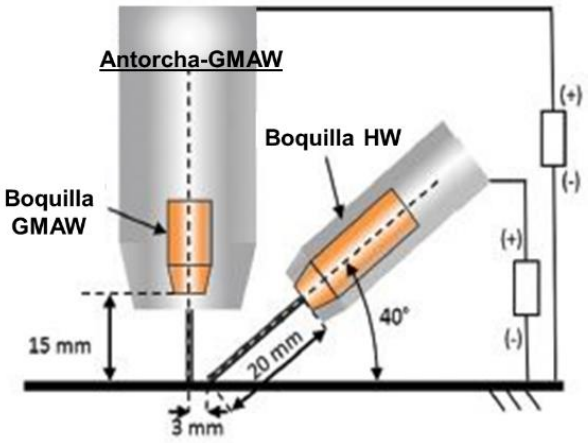


Figura II-12. Representación gráfica del proceso GMAW-HW (adaptado de [Günther, 2018-a])

Esta estrategia se crea debido a que en el proceso GMAW tradicional, al aumentar la tasa de aporte (aumentar la cantidad de material que se alimenta por unidad de tiempo) se aumenta el suministro de calor, lo que genera un exceso de calor en la pieza a fabricar. Por ello, como el calor que puede soportar el material no es ilimitado, no se puede aumentar indefinidamente el valor de la cantidad de material que se alimenta. De esta manera, sería de gran utilidad separar el suministro de energía y el aporte de material, para poder modificarlos independientemente.

Esto es exactamente lo que se consigue con la adición del hilo caliente, HW. Parte del calor suministrado por el electrodo principal GMAW, es utilizado para fundir el material introducido por el HW. Así, se funde más material con la misma energía, aumentando la tasa de aporte y reduciendo la dilución. Además, ya que las tasas obtenidas mediante esta variante del proceso GMAW son más altos se aumenta la productividad.

Hasta hoy en día, este proceso ha sido utilizado solo en procesos de recargue. Por ejemplo, Günther et al. [Günther, 2018-a] al aportar un recubrimiento basado en níquel para un endurecimiento de superficies mediante la tecnología GMAW-HW han sacado calor del baño fundido obteniendo diluciones más reducidas del 5% y tasas de aporte más elevadas de 12 kg/h. En cambio, Günther et al. [Günther, 2018-b] en otro estudio, donde se ha hecho otro endurecimiento de superficie basado en FeCrC, han obtenido tasas de aporte de 9 kg/h y diluciones del 10%, mientras que con el proceso GMAW tradicional la tasa de aporte obtenida es de 4,5 kg/h con una dilución del 50%. Además, para la misma cantidad de alimentación de hilo, comparado con el proceso GMAW tradicional, se ha reducido la potencia necesaria al utilizar el HW un 30% ya que el arco eléctrico del hilo principal y el baño fundido precalientan el hilo caliente, siendo esto suficiente para fundirlo al entrar en contacto con el baño fundido.

5 Aceros y aleaciones de aluminio

Los procesos WAAM permiten fabricar piezas metálicas en materiales considerados como soldables. Normalmente se emplean hilos metálicos para soldadura, que tienen un coste relativamente bajo y alta calidad con propiedades certificadas. El diámetro de los hilos utilizados generalmente varía desde 0,8 mm a 4 mm [Sames, 2016]. Por ello, la tecnología WAAM tiene una amplia disponibilidad de hilos metálicos pudiendo fabricar piezas en materiales tan diversos como aceros [Jin, 2020], aleaciones de aluminio [Derekar, 2018], aleaciones de níquel [Artaza, 2020-a], aleaciones de titanio [Artaza, 2020-b], aleaciones de cobre [Qi, 2018], etc.

Aún se está investigando la microestructura y las propiedades mecánicas obtenidas en el proceso WAAM en diferentes materiales. Durante el proceso el material sufre ciclos térmicos de calentamiento y enfriamiento que pueden generar microestructuras específicas. Estas microestructuras determinarán las propiedades mecánicas que tendrá el material por lo que el control de las mismas es de vital importancia [Li, 2019].

5.1 Aceros

Los aceros son aleaciones férricas que se utilizan ampliamente como materiales de ingeniería. Dependiendo de su composición se pueden conseguir diferentes tipos de aceros con sus propias propiedades. En general, se trata de materiales con alta resistencia a la tracción, fácil fabricación y bajo coste. Los aceros en combinación con tecnologías de fabricación aditiva WAAM se pueden utilizar ampliamente para fabricar piezas grandes con un coste global reducido en sectores como el sector naval [Queguineur, 2018], el sector gas & oil [Hejripour, 2019], el sector de la energía eólica [Dirisu, 2019], la construcción y la industria automotriz [Rodrigues, 2019-b]. En diversos estudios, mediante la tecnología WAAM se han fabricado piezas en diferentes tipos de aceros como, aceros dulces [Dirisu, 2019], inoxidables [Caballero, 2019] y aceros de herramienta [Xu, 2019]. A lo largo de esta tesis se analizará la fabricación mediante la tecnología WAAM basado en GMAW en aceros dulces.

Como ya se ha nombrado, en la tecnología WAAM el aporte se hace capa a capa lo que crea ciclos térmicos continuos y variables. A causa de estos ciclos, en aceros dulces que presentan un bajo contenido en carbono y en función de las proporciones de sus elementos de aleación se crea heterogeneidad en la microestructura y dispersión en las propiedades mecánicas. Los ciclos térmicos repetitivos con diferentes rampas de calentamiento, temperaturas de pico y

ratios de enfriamiento crea un tipo de microestructura compuesta. Esta microestructura es resultado de transformaciones de líquido a sólido y de sólido a líquido, así como de trasformaciones en caliente en estado sólido (ferrita a austenita o austenita a ferrita) y del enfriamiento (austenita a ferrita de límite de grano, a ferrita de Widmanstätten, a ferrita acicular, a bainita o a martensita). De esta manera, dependiendo del tipo de proceso de enfriamiento se pueden encontrar microestructuras, como la ferrita acicular, la bainita, la perlita, etc. Por ejemplo, los elementos de aleación de Mn y Ni aumentan la templabilidad al ayudar a la formación de ferrita acicular, mientras que el Mo y Cr incrementan la formación de bainita [Dirisu, 2019].

Las temperaturas de transformación de los fases principales durante el enfriamiento de los aceros C-Mn (aceros dulces) en cordones de soldadura son expuestos por Choi y Hill [Choi, 1978]:

1. Ferrita primaria nucleada entre 800 ºC y 650 ºC en los límites de grano de la austenita cuando el enfriamiento es moderado.
2. Las placas laterales de ferrita (o a menudo denominadas ferrita Widmanstätten) se forman entre 750 ºC y 650 ºC en los límites de grano de la austenita cuando aumentan las velocidades de enfriamiento.
3. La ferrita acicular de grano fino se forma por debajo de aproximadamente 650 ºC dentro de los granos de austenita.
4. Se forma una estructura de listones con una subestructura de dislocaciones significativa por debajo de 500 ºC; esta estructura es bainitica cuando las velocidades de enfriamiento son rápidas (> 50 ºC / s).
5. En aceros de alta aleación, en enfriamientos rápidos por debajo de 400 ºC a menudo se produce una microestructura martensítica.

Nuevamente, si se calienta el material por encima de la temperatura Ac1 (temperatura eutectoide), estos productos de transformación comienzan a transformarse en austenita otra vez. Estas transformaciones cíclicas pueden conducir a una microestructura compuesta con zonas más frágiles y menos frágiles contribuyendo a la dispersión en los datos de resistencia mecánica y resistencia al impacto [Shassere, 2019].

En cuanto a las propiedades mecánicas obtenidas, estos aceros se utilizan para aplicaciones de ámbito general con requerimientos no muy elevados. Dirisu et al. [Dirisu, 2019] han comparado las propiedades de resistencia y tenacidad a la fractura obtenidas en componentes de aceros dulces fabricadas con estrategias oscilada y de un único cordón. En cambio, Shassere et al. [Shassere, 2019] han fabricado dos paredes de dimensiones 572 x 470 mm y

305 x 362 mm para la caracterización del acero ER70S-6 fabricado mediante WAAM en ensayos de tracción y resiliencia Charpy. Haden et al. [Haden, 2017] han ensayado paredes delgadas fabricadas mediante WAAM en acero dulce ER70S-6 y acero inoxidable 304. En la Tabla II-4 se resumen las propiedades obtenidas por cada autor:

Tabla II-4. Comparativa de las propiedades mecánicas obtenidas en acero dulce ER70S-6 por diversos autores con estrategias de aporte diferentes

Estrategia	Límite elástico (MPa)	Límite último de rotura (MPa)	Elongación (%)	Autor
Pared doble	360 ± 7	475 ± 4	34-42	[Shassere, 2019]
Pared simple	370	480	35,5	[Dirisu, 2019]
Pared oscilada	420	510	33	
Pared simple	350	460	-	[Haden, 2017]

En los últimos años, se han llevado a cabo varios estudios sobre la caracterización del material y la fabricación de piezas mediante la tecnología WAAM en aceros dulces. Por ejemplo, Venturini et al. [Venturini, 2016] han estudiado la fabricación de cruces en forma de T en acero ER70S-6. Por otro lado, Somashekara y Suryakumar [Somashekara, 2017] han aportado mediante la tecnología de doble electrodo GMAW Tandem cordones de soldadura multimaterial. Los dos electrodos se han alimentado con hilos de acero dulce ER70S-6 y ER110S-G de diámetro 1,2 mm para poder fabricar piezas funcionalmente mejoradas. Además, los principales fabricantes de equipos WAAM y desarrolladores de la tecnología han fabricado diversos demostradores en aceros para diferentes aplicaciones como se puede ver en la Figura II-13.

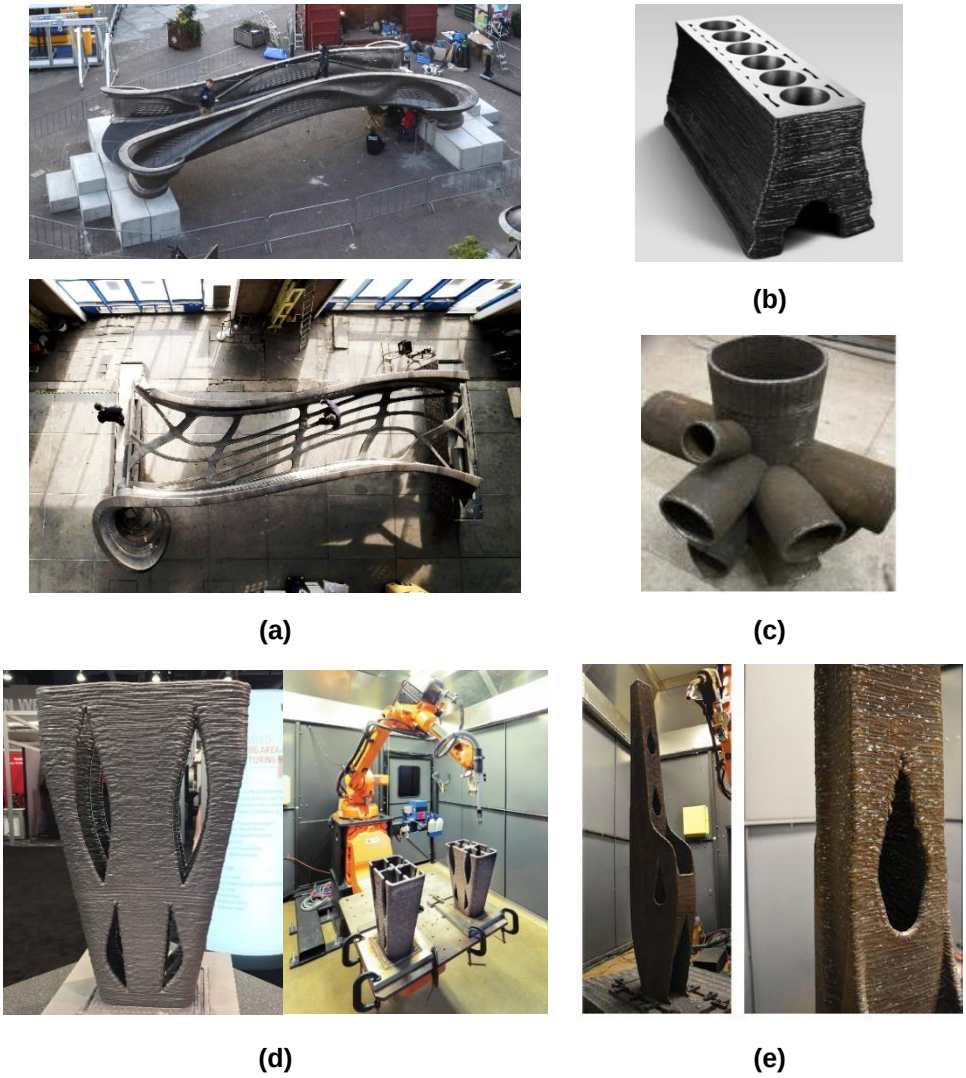


Figura II-13. (a) Puente fabricado por la compañía MX3D en acero inoxidable [MX3D, 2021], (b) Pieza con cavidades internas fabricada en acero [Lincoln Electric Additive, 2021], (c) Conector de 10 tubos multidireccionales fabricado en hilo YHJ507M [Yili, 2018], (d) Pieza con cavidades internas fabricada en acero [Lincoln Electric Additive, 2021], (e) Parte del brazo de una excavadora fabricada en acero [Greer, 2019]

5.2 Aleaciones de aluminio

El aluminio tiene una capacidad singular para formar aleaciones con diversos elementos (tanto metálicos como no metálicos), produciendo materiales ligeros de alta resistencia específica y alta resistencia a la corrosión. Probablemente sea una de las opciones más interesantes y económicamente competitivas para la fabricación de piezas grandes. Sus principales aplicaciones industriales se pueden ver en diferentes sectores como la automoción [Klein, 2020], sector naval [Taşdemir, 2020] y sector aeroespacial [Starke, 2010]. Sin embargo, la soldadura de aleaciones de aluminio puede ser problemática dependiendo de la composición de la aleación utilizada, a causa de la formación de porosidad,

la presencia de películas de óxido en la superficie y el agrietamiento durante el proceso de solidificación entre otros inconvenientes [Derekar, 2018]. Las series de aluminio Al-Cu (2xxx) [Fang, 2021], Al-Si (4xxx) [Ma, 2019] y Al-Mg (5xxx) [Horgar, 2018] son aptas para la fabricación mediante la tecnología WAAM. Sin embargo, las series 7xxx y 6xxx son inadecuadas porque durante el aporte se generan defectos metalúrgicos debido a baños fundidos turbulentos [Wu, 2018-b].

Entre las diferentes tecnologías WAAM disponibles en el mercado, el proceso WAAM basado en GMAW es prometedor para lograr grandes piezas de aluminio sin defectos [Williams, 2016-b]. Específicamente, la capacidad de soldadura limitada de las aleaciones de aluminio significa que dentro de la tecnología GMAW se necesitan fuentes de soldadura con modos de trabajo específicos para el aluminio y que las otras tecnologías de aporte como la PAW y la GTAW pueden presentar problemas. En concreto, el modo de trabajo AC pulsado dentro de la tecnología GMAW es especialmente adecuada para este tipo de aportes.

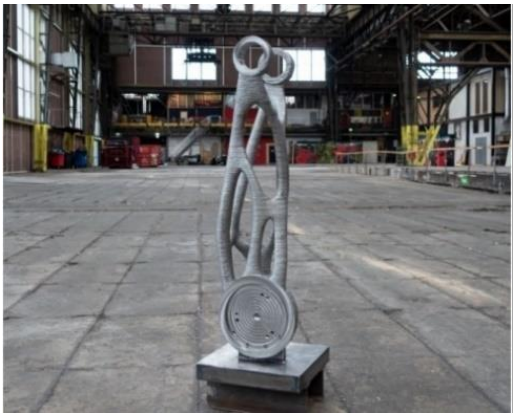
En consecuencia, la porosidad es el tema clave y el desafío principal en la fabricación mediante WAAM de las aleaciones de aluminio. Esta porosidad tiene su origen en los diferentes valores de solubilidad del hidrógeno en aluminio en estado sólido y líquido. La porosidad aparece cuando la cantidad de hidrógeno libre excede ciertos niveles dentro del aluminio solidificado durante el proceso de aporte y puede afectar a las propiedades mecánicas de las piezas que se fabrican [Gu, 2019]. En algunos estudios, se han utilizado técnicas mecánicas que requieren dispositivos adicionales, como laminado entre capas [Gu, 2018] [Gu, 2020] y martillado entre capas [Fang, 2021] para reducir los niveles de porosidad, obtener refinamiento del grano y mejorar las propiedades mecánicas. En otros estudios, en cambio, también se han utilizado tratamientos térmicos con el mismo fin [Gu, 2016].

En cuanto a las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 5356 aportado mediante WAAM, utilizado en esta tesis, Li et al. [S. Li, 2020] han comparado la microestructura y las propiedades mecánicas de esta aleación aportada utilizando dos tipos de gases de protección: el argón y el nitrógeno de alta pureza. Las propiedades mecánicas obtenidas en este estudio en paredes de un único cordón se pueden ver en la Tabla II-5.

Tabla II-5. Propiedades mecánicas del aluminio 5356 fabricado mediante WAAM utilizando como gas de protección el argón o el nitrógeno de alta pureza

Gas de protección	Límite elástico (MPa)	Límite último de rotura (MPa)	Elongación (%)
Ar	130 ± 3	275 ± 2	28 ± 5
N_2	150 ± 2	200 ± 4	4 ± 1

En las últimas investigaciones que se han llevado a cabo se ha avanzado de manera considerable en la tecnología WAAM para la fabricación de piezas en aluminio. Por ejemplo, la empresa MX3D [MX3D, 2021] fabrico una pieza de un brazo robótico optimizada topológicamente con el que redujo considerablemente la cantidad de material utilizado. La empresa Ramlab [RAMLAB, 2021] por su parte, ha fabricado recientemente una hélice de barco verificado para el grupo Damen Shipyard [Damen, 2021] que ya está en funcionamiento en una aleación de níquel-aluminio-bronce. En la Figura II-14 se pueden ver varios ejemplos.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura II-14. (a) Pieza de un brazo robótico optimizada topológicamente y fabricada en aluminio [MX3D, 2021], (b) Pieza fabricada para la optimización de las estrategias de aporte por RASM systems en aluminio [Ma, 2019], (c) Pieza de aluminio fabricada mediante WAAM de 10 m de largo [WAAMMAT, 2021], (d) Nervio de aluminio de 2,5 m de largo fabricado mediante WAAM obteniendo ahorros de material de más de 500 kg [Martina, 2015-a], (e) Hélice de barco fabricada mediante WAAM en aleación de níquel-aluminio-bronce [RAMLAB, 2021]

6 Máquinas comerciales con tecnología WAAM

En cuanto a las máquinas que incorporan la tecnología WAAM basado en GMAW, existen soluciones de dos tipos principalmente: sistemas basados en máquina-herramienta y sistemas robóticos [Urhal, 2019]. La mayoría de los sistemas WAAM usan un robot industrial antropomórfico como mecanismo de movimiento y lo más común es que lleven un sistema local de gas de protección [Wu, 2018-b]. En el mercado ya existen algunas soluciones comerciales, que incorporan sistemas de control y monitorización integrados y softwares CAD/CAM específicos. Sin embargo, se puede combinar casi cualquier manipulador con una fuente de soldadura para crear un sistema WAAM sencillo. Por ello, se dice que el equipamiento necesario para el proceso WAAM es barato en comparación con sistemas que usan haces de electrones, o láseres de precios elevados. Además, la tecnología WAAM basado en GMAW no necesita cámaras inertes para trabajar en materiales comunes como aceros, aluminios, etc. reduciendo aún más el precio del equipamiento. Para fabricar piezas con la tecnología WAAM basado en GMAW pueden distinguirse tres tipos de máquinas: máquinas de 3 ejes, máquinas de 5 ejes o robots antropomórficos. A continuación, se presentan los distintos desarrollos de máquinas o robots que se están llevando a cabo tanto en universidades, como en centros de investigación, como en empresas:

6.1 ADDILAN

La empresa ADDILAN [ADDILAN, 2021] comercializa una máquina de 3+2-ejes (Figura II-15) con una mesa basculante que incluye tanto la tecnología WAAM basado en a GMAW, como el basado en PAW y el basado en GTAW. Esta máquina tiene una gran versatilidad debido a su particular arquitectura y al software de CNC abierto. Esta máquina también está equipada con una cámara inerte y cerrada que permite la fabricación de piezas en materiales reactivos, como el titanio. La envolvente de construcción para la fabricación de piezas es de 1300 x 900 x 500 mm con un peso máximo de 300 kg.



Figura II-15. Máquina ADDILAN v.0.1 [ADDILAN, 2021]

6.2 GEFERTEC

La empresa alemana GEFERTEC [GEFERTEC, 2021] presento su serie de máquinas GTarc AM machine (Figura II-16) que incorporan la tecnología de fabricación 3DMP® (tecnología WAAM). Dentro de esta serie, las máquinas de 3 ejes pueden fabricar piezas de máximo 3 m^3 con un peso máximo de 3000 kg y los de 5 ejes piezas de más de 0,8 m^3 con un peso máximo de 500 kg.



Figura II-16. Máquina WAAM GTArc603 [GEFERTEC, 2021]

6.3 AML3D

La compañía AML3D [AML3D, 2021] comercializa su máquina WAAM basado en GMAW llamado ARCEMY (Figura II-17). Esta máquina integra un robot o dos robots de soldadura que van montados en carriles programados específicamente para fabricar componentes metálicas. Además, incluye sistemas de almacenamiento de hilo y gas protector. Por último, el espacio de fabricación se puede alargas según las necesidades del cliente.



Figura II-17. Máquina ARCEMY para fabricación WAAM basado en GMAW [AML3D, 2021]

6.4 RAMLAB

El grupo de empresas holandesas RAMLAB [RAMLAB, 2021] ha desarrollado un sistema de WAAM basado en un robot de 6 ejes y dos brazos móviles para fabricar piezas de hasta 2 x 2 x 2 m de tamaño (Figura II-18). En la gran impresora metálica, los dos brazos manipulan la pieza mientras es aportado, al mismo tiempo que el proceso de aporte es realizado por el robot antropomórfico. Esta configuración y modo de operación es único en el mundo. Además, esta empresa también comercializa su sistema de monitorización y control MaxQ.



Figura II-18. Máquina RAMLAB durante la fabricación de una hélice de barco para el grupo Damen Shipyard [RAMLAB, 2021]

6.5 Lincoln Electric

Lincoln Electric [Lincoln Electric Additive, 2021] mediante sus empresas Wolf Robotics y Lincoln Electric Additive Solutions, está comercializando soluciones industriales basados en robots antropomórficos para la fabricación mediante WAAM (Figura II-19). En concreto, han desarrollado un sistema con un robot antropomórfico y una mesa móvil.



Figura II-19. Solución basada en un robot antropomórfico de la empresa Lincoln Electric [*Lincoln Electric Additive, 2021]*

6.6 MX3D

La empresa MX3D [MX3D, 2021] lleva varios años colaborando con importantes empresas del sector de la ingeniería y la construcción para implementar soluciones robóticas on-site totalmente autónomas para WAAM (Figura II-20). También, comercializa su software Metal XL y fabrica piezas a demanda mediante WAAM.

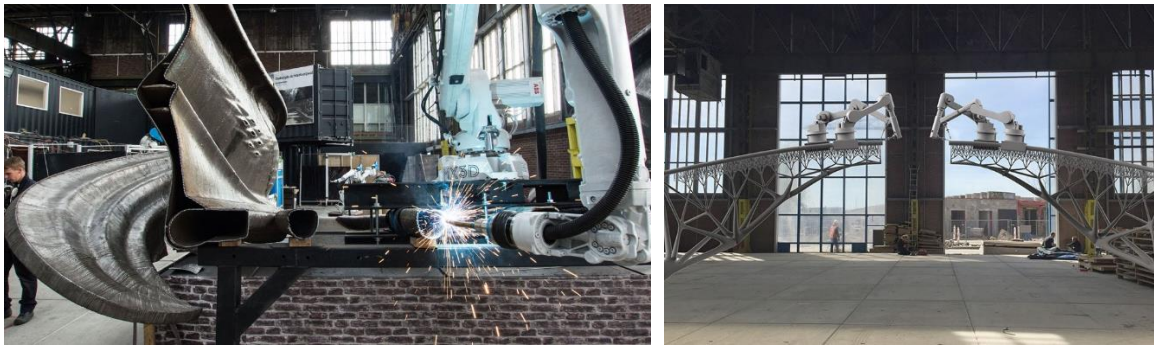


Figura II-20. Ejemplos de aplicaciones de MX3D en el sector de la construcción [MX3D, 2021]

6.7 Universidad de Cranfield

La Universidad de Cranfield es una de las principales referencias mundiales en WAAM. Desde su programa WAAMMat [WAAMMAT, 2021] ha realizado multitud de proyectos de investigación y desarrollo en la tecnología WAAM, trabajando en distintos materiales (aluminio, aleaciones de acero, titanio, Inconel, etc.), abriendo camino en temas de inspección, monitorización y postprocesos avanzados, etc. Desde el punto de vista de máquina, para la tecnología WAAM basado en GMAW ha realizado proyectos con robot antropomórficos como la que se ve en la Figura II-21. En este proyecto en concreto han desarrollado una célula de robótica con dos robots sincronizados montados en dos railes para fabricación de piezas metálicas de gran tamaño.



Figura II-21. Célula robótica de WAAM basado en GMAW con 2 robots trabajando en paralelo, para aumentar la productividad [WAAMMAT, 2021]

7 Monitorización y control del proceso WAAM

En los últimos estudios realizados en las tecnologías DED se han incorporado sistemas de monitorización y control del proceso en las máquinas y se han desarrollado algoritmos de control que permitan diagnosticar el proceso durante el aporte. Es decir, para obtener un proceso industrial de aporte fiable y eficiente, es necesario la inclusión de sistemas de control de lazo cerrado dentro del proceso que actúen sobre los parámetros principales adaptándose automáticamente según los datos registrados durante el proceso.

Esto es fundamental para asegurar la calidad de las piezas y prevenir errores. Los principales defectos que se encuentran en piezas fabricadas mediante WAAM basado en GMAW son poros (sobre todo en aluminio), zonas en las que no se ha fundido el material, tensiones residuales causadas por los ciclos repetitivos de calentamiento y enfriamiento inherentes al proceso WAAM que determinarán las propiedades que tendrá el material a fatiga y que pueden

crear distorsión y reducir las tolerancias [Rodrigues, 2019-b], deformaciones (originadas cuando las tensiones residuales están entre los valores del límite elástico y la tensión última de rotura), grietas (cuando la tensión residual supera la tensión última de rotura) [Horgar, 2018], delaminación [Vimal, 2020] y salpicaduras.

Con una elección de los parámetros de proceso adecuados y la monitorización y control del proceso en todo momento se pueden reducir este tipo de errores. Además, en diversos estudios se han empleado otros métodos para el control de las tensiones residuales, tales como, tratamientos térmicos [Bermingham, 2018], adecuación de la estrategia de aporte [Mughal, 2005], mecanismos de calentamiento/enfriamiento *in situ* [Lu, 2018] [Denlinger, 2015] y hasta técnicas de deformación en frio [McAndrew, 2018].

Por todo ello, es esencial introducir sistemas de monitorización e inspección en el proceso WAAM [Everton, 2016]. El proceso WAAM es muy sensible a las variaciones de los parámetros de proceso por lo que la monitorización de los parámetros y su control en lazo cerrado son esenciales para la rectificación del proceso durante la fabricación de las piezas. De esta manera, se pueden reducir las tensiones residuales de la pieza y los defectos que contiene.

Hoy en día aun, los sistemas de monitorización y control del proceso WAAM están en un estadio inicial y los estudios sobre ello se realizan en el caso de uso más simple que sería una pared de un único cordón. Además, en la mayoría de las ocasiones, estas soluciones se basan en sistemas de monitorización del proceso de aporte. Por ello, en el mercado en estos momentos no existen muchas soluciones integrales que incorporen estos sistemas de monitorización y control que adquieran las señales del proceso WAAM y de los sensores externos instalados y tengan incorporado un algoritmo de toma de decisiones para optimizar el proceso. Este tipo de algoritmos podrían venir incorporados en un software específicamente creado para el proceso WAAM, que incorporara todas las etapas desde el diseño inicial hasta la monitorización y control del proceso, lo que permitiría la automatización completa. Además, esta automatización seria esencial para la introducción del proceso WAAM en el concepto de Industria 4.0. Hoy en día, no hay ninguna solución de software en el mercado que pueda llegar a un grado de madurez suficiente como para poder alcanzar estos objetivos.

En la Figura II-22 se resume de manera esquemática la estructura de los diferentes sistemas de control y monitorización del proceso WAAM estudiados hasta el momento.

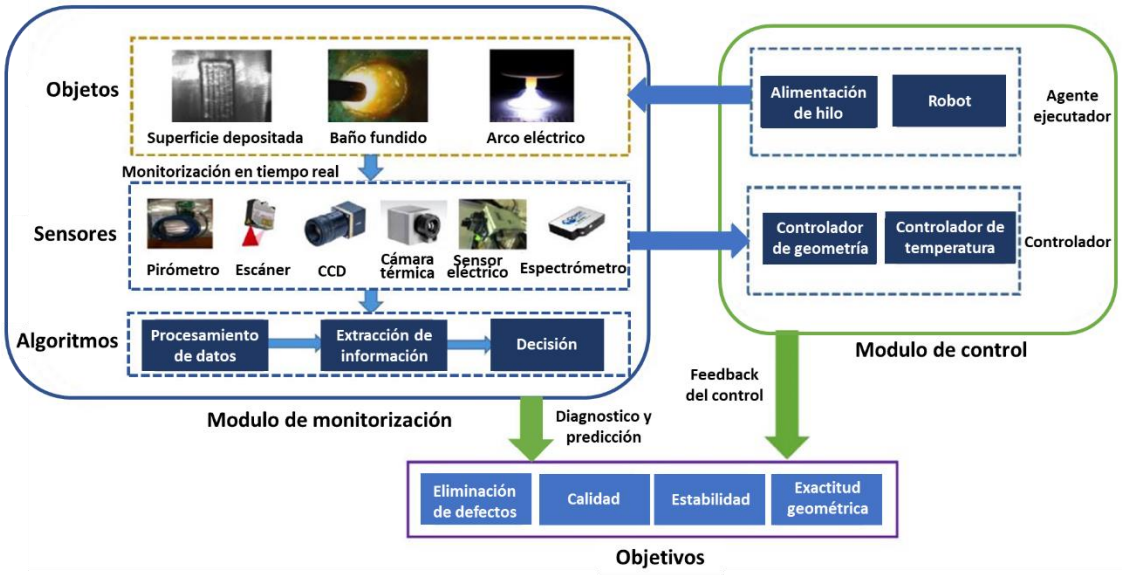


Figura II-22. Sistemas de monitorización y control para WAAM (adaptado de [Xia, 2020])

Para la monitorización del proceso WAAM, por un lado, al igual que para los procesos de soldadura tradicional se adquieren las señales de proceso internas de intensidad, tensión, alimentación de hilo, velocidad de la máquina, etc. [Artaza, 2017]. Por ejemplo, Wang et al. [Wang, 2017] han creado un control adaptativo, para procesos de soldadura, que ajustaba la longitud del arco según la señal de tensión adquirida durante el proceso, aumentando la estabilidad y reduciendo las salpicaduras.

Por otro lado, también se pueden adquirir señales térmicas, acústicas, espectrales, eléctricas e imágenes en el espectro visible [Xia, 2020] que podrán ser tratadas para controlar el proceso. Generalmente, lo más común y eficiente es la adquisición de imágenes en el espectro visible y señales térmicas. En diversos estudios, para la adquisición de este tipo de señales e imágenes se han colocado diferentes sensores externos.

-Adquisición de imágenes en el espectro visible:

La adquisición de imágenes es el método más directo de monitorización y se emplea para obtener la morfología de la superficie aportada. En este sentido, es importante recalcar que la forma geométrica de la superficie aportada es uno de los aspectos esenciales para el control del proceso. Para ello existen dos escenarios diferentes: control durante el proceso (*online*) o fuera del proceso (*offline*). Comenzando con la monitorización durante el proceso (*online*), se utilizan cámaras CCD con filtros, los cuales son necesarios para atenuar la extrema variación en la luminosidad de la zona de soldadura creado por la luz del arco. Gracias a este tipo de cámaras CCD, He et al. [He, 2016] han sido capaces de obtener la forma geométrica del cordón aportado en un

proceso de llenado de juntas mediante soldadura. Para ello, se ha utilizado una cámara CCD puesta de tal manera que captura la sección trasversal de la junta y así se ha podido determinar durante el proceso la geometría del material aportado. Centrando el análisis de esta tecnología en el proceso WAAM, Xiong et al. [Xiong, 2013] [Xiong, 2016] han empleado dos cámaras CCD con los filtros adecuados para determinar la anchura y la altura de cada cordón durante el proceso y controlarlos mediante la adecuación de la velocidad de avance como se observa en la Figura II-23.

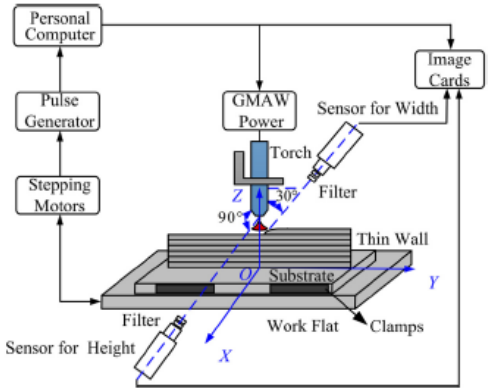


Figura II-23. Diagrama esquemático de un sistema de control basado en cámaras CCD para el proceso WAAM [Xiong, 2016]

Por otro lado, para la monitorización fuera de proceso (*offline*), se puede emplear un escáner láser para la medición geométrica de cada capa después de haberlas aportado. Así, se obtiene información en tres dimensiones de los cordones de soldadura aportados en forma de nube de puntos. Mediante esta nube de puntos se puede generar una imagen de tres dimensiones que representa el material aportado hasta el momento, pudiendo corregir las estrategias de aporte en función de la medición. Ma et al. [Ma, 2019] han utilizado un escáner láser para determinar si la altura de la pieza es la deseada y establecer si se procederá a la etapa final de mecanizado. Por último, Hausser et al. [Hauser, 2020] han utilizado cámaras de alta velocidad para determinar los efectos de las diferentes inclinaciones de la antorcha en el proceso WAAM basado en GMAW. Para ello, calculan digitalmente tanto la altura de las capas como las dimensiones del baño fundido de los videos adquiridos con la cámara nombrada. De estos datos, les es posible determinar si la pared aportada con una inclinación dada de antorcha será adecuada.

-Adquisición de señales térmicas:

La historia térmica puede afectar a las propiedades mecánicas y a la exactitud geométrica de las piezas fabricadas mediante WAAM. De hecho, la historia térmica influye en propiedades tan importantes como el mapa de tensiones

residuales y las deformaciones resultantes del proceso WAAM, así como en las transformaciones metalúrgicas resultantes de continuos ciclos de calentamiento y enfriamiento. En este sentido, es importante recalcar que el ciclo térmico puede ser complejo de estimar y conocer a priori. Por ello, la adquisición de las señales térmicas durante el proceso *(online)* es de gran importancia para controlar el proceso y conocer la historia térmica. En cuanto a esta adquisición, aparecen en los estudios realizados hasta el momento dos líneas principales.

Por un lado, hay trabajos en los que se mide la temperatura de la pieza aportada para determinar el campo de temperaturas. En estudios anteriores, por ejemplo, Yang et al. [Yang, 2017] han utilizado una cámara termográfica infrarroja para medir el campo de temperaturas de las paredes fabricadas mediante WAAM y determinar la influencia del tiempo de enfriamiento entre capas en la ondulación superficial de las paredes. Este método podría ser utilizado para determinar y controlar el tiempo de enfriamiento óptimo. En otro estudio, se ha monitorizado la temperatura del baño fundido durante el proceso mediante un pirómetro y se ha utilizado este método para determinar los tiempos de enfriamiento entre capas [Artaza, 2017]. También se podrían utilizar termopares para la misma función.

Por otro lado, hay otros trabajos en los que se monitoriza el baño fundido analizando los movimientos del material fundido y su dinámica. Esta línea se centra en la detección de los posibles defectos y el control de la estabilidad del proceso. Para ello, se determinan las dimensiones del baño fundido durante el proceso para poder controlarlo. Por ejemplo, Abe et al. [Abe, 2020] han controlado la tensión introducida en el proceso WAAM mediante la medición de la temperatura mediante un termómetro de radiación y la simulación de las dimensiones del baño fundido. De esta forma consiguen un proceso de aporte de material más estable.

8 Diseño CAD y diseño de trayectorias para WAAM

La fabricación aditiva metálica, y en concreto la tecnología WAAM, es capaz de fabricar nuevos diseños en términos de formas, estructuras de celosías (*lattice*) y estructuras internas, como el conector de 10 tubos diferentes que han fabricado Yili et al. [Yili, 2018] o las cuatro opciones de diseño que han planteado Ya y Hamilton [Ya, 2018] para la fabricación de una hélice de barco. Mediante este tipo de tecnologías se pueden obtener geometrías con casi total libertad de diseño. Por ello, herramientas como la optimización topológica [Ponche, 2014] se pueden utilizar para diseñar o rediseñar piezas para fabricar mediante tecnologías aditivas. En este tipo de método se determina el diseño geométrico óptimo de las piezas reduciendo el peso al máximo posible y por lo

tanto reduciendo la cantidad de materia prima utilizada cumpliendo con los requerimientos necesarios. De esta manera, no se tienen que cumplir las restricciones de diseño que imponen los sistemas convencionales de fabricación.

En más detalle, el objetivo principal de la optimización topológica es el aligeramiento estructural de los componentes manteniendo las funcionalidades mecánicas del mismo. A este respecto, las cargas mecánicas son los datos de entrada para crear diseños topológicamente optimizados. Es decir, para optimizar topológicamente una pieza se empieza creando un modelo 3D en fase de borrador en el que se aplican diferentes cargas y se calculan las tensiones aplicadas a las piezas. En este nivel, se remodela la geometría de las piezas manteniendo las áreas que trabajan desde un punto de vista estructural y se elimina el resto. De esta manera, se obtiene la geometría final que cumple con los requisitos mecánicos y de diseño. Además, al finalizar el proceso puede que se necesiten softwares de predicción para asegurar que se cumplirán los requerimientos mecánicos de la pieza [Greer, 2019]. Por ejemplo, se puede ver en la Figura II-24 una pieza de un brazo robótico topológicamente optimizado que se fabricó posteriormente mediante la tecnología WAAM.

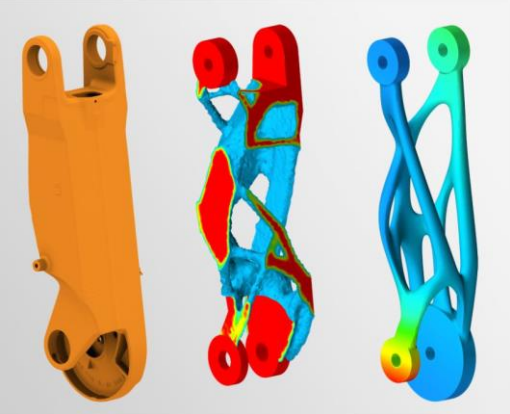


Figura II-24. Rediseño de un brazo robótico mediante optimización topológica [MX3D, 2021]

Por otro lado, para la fabricación de un diseño convencional mediante WAAM, aunque no se haga un rediseño completo siempre se tendrán que añadir demasías.

Una vez que el diseño para fabricarlo mediante tecnologías aditivas este definido, se utilizan softwares o modelos de planificación de procesos asistidos mediante ordenadores (*Computer Aided Manufacturing, CAM*) para determinar la secuencia de aporte y generar el programa de máquina, creando trayectorias. Existe un desarrollo de Siemens NX, que ofrece una solución desde el diseño hasta la impresión o la validación posterior a la impresión, en un único sistema integrado. De esta manera Siemens NX industrializa la

fabricación aditiva de modo que no solo pueda fabricar prototipos, sino también productos revolucionarios con una tecnología innovador [González, 2017]. Por otro lado, en la actualidad también la empresa Autodesk en su software PowerMill (Autodesk, Estados Unidos) ha generado una pestaña adicional para generar trayectorias para tecnologías de DED para comandar a máquina o robot. Dependiendo del tipo la geometría de la pieza fabricar y el tipo de trayectoria elegida (raster, zigzag, espiral, de contorno, etc.) las piezas se fabricaran sin defectos internos como faltas de llenado o no homogeneidades [Michel, 2019] [Jafari, 2021].

Para la programación de estas trayectorias es fundamental saber las características geométricas de los cordones aportados con cada conjunto de parámetros elegidos. Por ello, la modelización de la anchura y la altura de los cordones simples en WAAM es de gran importancia. Por ejemplo, la anchura del cordón obtenidos con cada conjunto de parámetros de aporte es un parámetro esencial para determinar la distancia de solapamiento entre los cordones. Asimismo, la altura del cordón es crucial para controlar el crecimiento por capa. Por lo tanto, los modelos de predicción de la geometría del cordón de soldadura son un área de estudio común en la literatura anterior [Li, 2020-b] [Dinovitzer, 2019].

Como se ve en la Figura II-25 el proceso WAAM, en general, comenzaría por un modelo 3D de la pieza a fabricar, se rediseñaría este modelo para WAAM; después, se dividiría el modelo en capas y se crearían las trayectorias de cada capa mediante un software CAM introduciendo las dimensiones estimadas del cordón de soldadura. Una vez listas las trayectorias se determinarían los parámetros de proceso y se procedería a fabricar la pieza en un robot o una maquina Gantry mientras que se monitorizan los parámetros de proceso y de los sensores instalados en la máquina. Mediante los datos monitorizados en tiempo real se controlará el proceso y también se modelizarán las dimensiones de los cordones aportados por si no se hubiesen incorporado bien en el software CAM estos valores repetir el diseño de trayectorias.

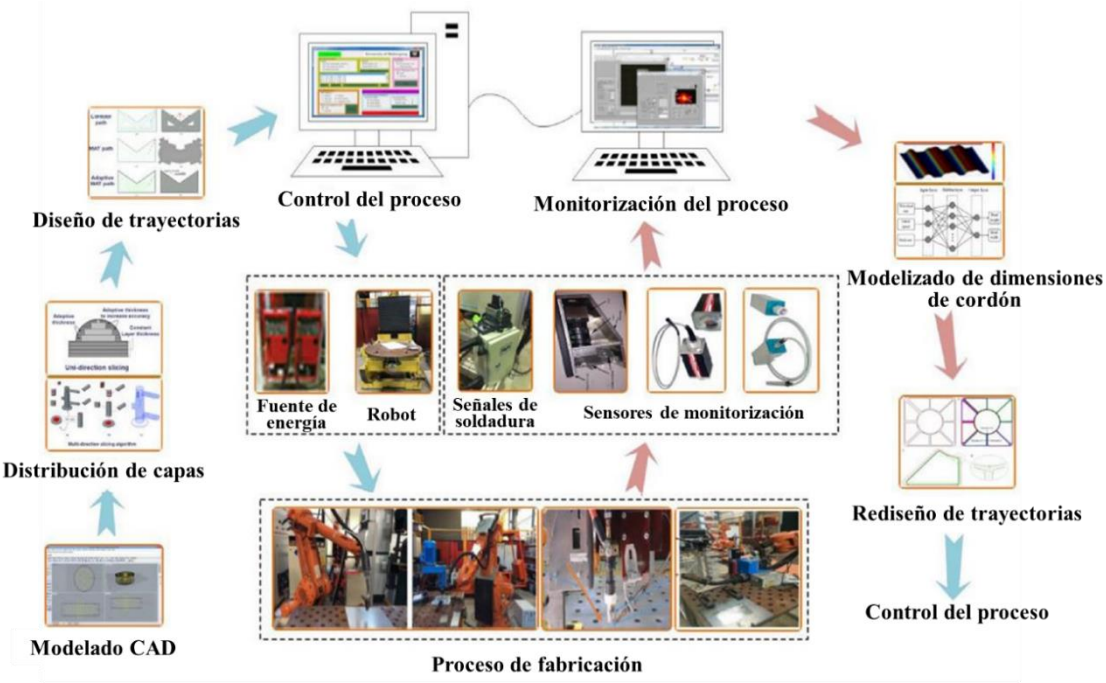


Figura II-25. Concepto del sistema WAAM integral (adaptado de [Wu, 2018-b])

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III: DESARROLLO DE UN SISTEMA ROBÓTICO PARA LA TECNOLOGÍA WAAM BASADA EN GMAW CON CONTROL DE ALTURA

1 Introducción

En la fabricación aditiva mediante tecnología WAAM basado en GMAW es necesario instalar una antorcha conectada a una fuente de soldadura que es manipulada por una máquina con una cinemática concreta. Esta máquina podría ser tanto un sistema basado en máquina-herramienta cartesiana como un sistema robótico. En esta tesis se ha desarrollado un sistema robótico para este propósito y toda la experimentación se ha llevado a cabo en la misma.

El objetivo principal de este capítulo ha sido explicar el procedimiento llevado a cabo para el desarrollo de un sistema robótico que integra sistemas de monitorización y control (control de altura) que tal y como se ha analizado en el Estado del Arte son de extrema importancia para poder ejecutar el proceso de manera automatizada y controlada. Para ello, en primer lugar, se ha detallado el set-up utilizado y se han descrito los sistemas de comunicación y monitorización que se han añadido a la instalación robótica. En segundo lugar, se han determinado los parámetros principales del proceso WAAM basado en GMAW y se han analizado los modos de trabajo de la fuente de soldadura Titan XQ 400 AC puls (EWM, Alemania) utilizados a lo largo de esta tesis. Por último, se ha desarrollado e instalado un control de altura que es de vital importancia para una ejecución controlada del proceso.

2 Descripción del sistema robótico para WAAM basado en GMAW

La configuración del sistema desarrollado se basa en un sistema robótico de soldadura en mesa fija, tal y como se puede observar en la Figura III-1. Este sistema se ha empleado para toda la experimentación llevada a cabo en esta tesis. Comenzando con la fuente de soldadura, se trata de una fuente Titan XQ 400 AC puls (EWM, Alemania) que alimenta la antorcha de soldadura GMAW, iSTM ABIROB W, colocada en un robot antropomórfico Fanuc Arc Mate 100-iC (Fanuc, Japón) para poder fabricar piezas capa a capa. Asimismo, la célula está equipada con un sistema de alimentación de hilo M drive 4 Rob5 XR RE (EWM, Alemania) y un sistema de gas de protección. Este gas se introduce en

el proceso desde bombonas de almacenamiento hasta la antorcha para que proteja el baño fundido durante el proceso de aporte.

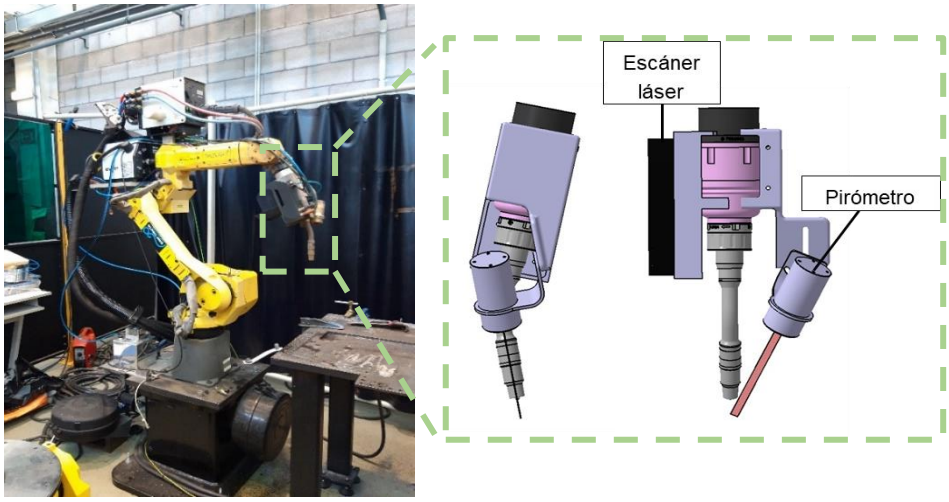


Figura III-1. Set-up del sistema con representación detallada de la antorcha de soldadura

En este sistema, la bobina de hilo se coloca en un soporte que se encuentra en la parte inferior y se tira del hilo mediante el arrastrador para después introducirlo en el proceso con una velocidad dada. Desde el arrastrador a la antorcha se colocan sirgas por dónde pasa el hilo que, en el caso del acero, son de acero y en el caso del aluminio son de teflón, tal y como se recomienda. Además, los rodillos del arrastrador para cada material también son diferentes. Para el aluminio se utilizan unos rodillos con una junta de tipo “U” y para aceros en cambio, se emplean rodillos con junta tipo “V”.

Aunque la tecnología GMAW da la opción de orientar la antorcha en el sentido del crecimiento del material, en toda la experimentación llevada a cabo en esta tesis la antorcha de soldadura se ha colocado en posición vertical, es decir, perpendicular al sustrato. De esta manera, se ha eliminado una variable del proceso, reduciendo el número de parámetros a ensayar, aunque se podría conseguir una configuración que sería capaz de aportar el material en todas las direcciones, incluso en voladizo. El diámetro de la tobera utilizada para la correcta salida del gas de protección en el proceso ha sido de 20 mm en todos los casos.

Además, para controlar el proceso, se han colocado dos instrumentos auxiliares en la antorcha de soldadura (Figura III-1). Por un lado, se ha instalado un pirómetro Optris CT (Optris GmbH, Alemania), orientado hacia el baño fundido para medir la temperatura del material aportado en todo momento y poder determinar los tiempos de enfriamiento entre cordones. Los tiempos de enfriamiento son períodos no productivos necesarios entre capas para

promover el correcto crecimiento de las piezas, sin provocar el colapso de las mismas por exceso de calor. Para ello, la instalación del pirómetro permite al operario introducir el valor de la temperatura hasta la cual se espera para aportar la siguiente capa. Cuando la temperatura de la superficie que marca el pirómetro es inferior a la consignada por el operario se reinicia el proceso de aporte, por lo que no es necesario establecer un tiempo de enfriamiento constante, sino que se regula directamente con la temperatura del aporte de material realizado. Para la medición de la temperatura superficial, se ha considerado una emisividad de 0,5 para el acero dulce y el aluminio siguiendo las recomendaciones proporcionadas por el proveedor.

Por otro lado, también se ha utilizado un escáner láser, Laser Scanner Quelltech Q4-120 Series (Quelltech, Alemania), que en la posición del robot que se puede apreciar en la Figura III-2 escanea la geometría del material aportado tras finalizar cada capa. De esta manera, se obtiene una nube de puntos que representa la forma geométrica **transversal** de las capas aportadas. Gracias a esta nube de puntos, aparte de monitorizar los datos, el operario puede decidir la posición Z para la siguiente capa. Así, se puede controlar el crecimiento y ajustar el valor de la altura programada para cada capa. Para mayor detalle, este láser mide 244 puntos por perfil y con el sistema diseñado en esta tesis se ha recogido un perfil cada 2 mm avanzados.

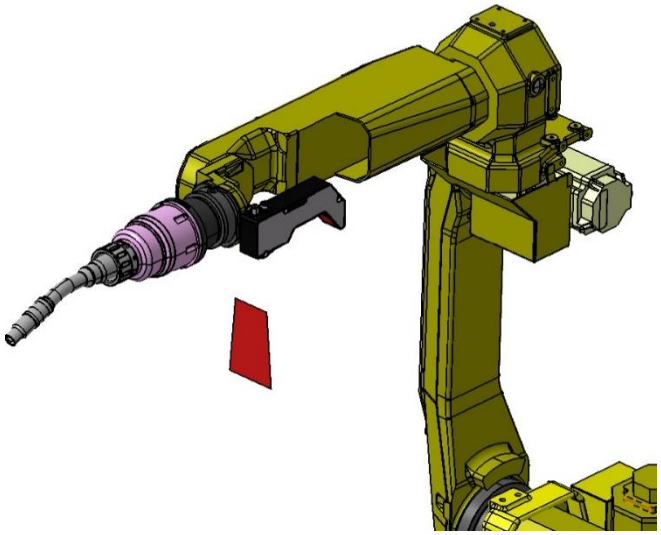


Figura III-2. Posición de escaneo del robot

Para poder controlar las comunicaciones entre los diferentes equipos que componen el sistema robótico diseñado e integrar las reglas de control se ha creado una aplicación PC. Esta aplicación, por un lado, monitoriza los datos adquiridos mediante el láser y el pirómetro y recoge las señales internas de la fuente de soldadura y del robot: intensidad, tensión, velocidad de alimentación

de hilo y velocidad de avance. También monitoriza las posiciones de los ejes del robot y los ángulos de la muñeca respecto a los ejes activos. Esta monitorización se ha llevado a cabo durante los procesos de fabricación con una frecuencia de 2 Hz. Por otro lado, la aplicación PC también controla el proceso y determina los pasos a seguir en cada etapa.

Así, para que el robot, la aplicación PC, el láser y el pirómetro hayan podido comunicarse adecuadamente se ha establecido un sistema de comunicación entre los dispositivos que se puede ver en la Figura III-3:

- Láser-PC: Mediante esta comunicación la aplicación ha controlado el láser y el láser ha proporcionado mediciones al ordenador. Esta comunicación se ha llevado a cabo mediante Ethernet.
- Pirómetro-Robot: Mediante esta comunicación las mediciones del pirómetro se han escrito en un registro del robot en tiempo real. Esta comunicación se ha hecho mediante señales analógicas.
- PC-Robot: Se ha desarrollado un protocolo de comunicación propio para mandar parámetros de aporte, escribir las posiciones para soldar, escribir y leer operaciones, escribir registros numéricos, etc. Esta comunicación se ha llevado a cabo mediante Modbus TCP.
- Robot-fuente de soldadura: Ha servido para darle órdenes a la fuente de soldadura y para leer las señales que le devuelve la fuente de soldadura para mandarlos al PC. Esta comunicación se ha hecho mediante Profibus.

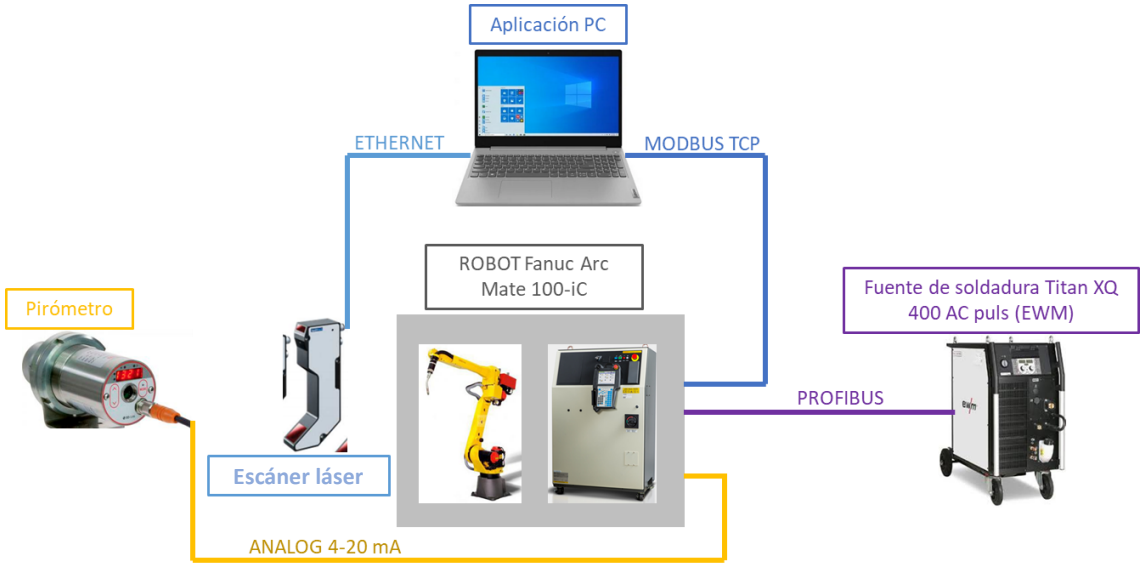


Figura III-3. Esquema del protocolo de comunicación utilizado para el sistema robótico desarrollado

3 Parámetros ajustables en el proceso WAAM basado en GMAW sinérgico

Hoy en día, se pueden ajustar varios parámetros del proceso WAAM basado en GMAW sinérgico para controlar varios aspectos del proceso. En la Tabla III-1 se resumen los parámetros principales de este proceso.

Tabla III-1. Parámetros principales del proceso WAAM basado en GMAW sinérgico

Parámetros	
Modo de trabajo ***Material*** ***Diámetro de hilo [mm]*** ***Tipo de gas protector***	***Job*** *(dependiente de cada fuente de soldadura)* → Estándar / Pulsado
Rampas de inicio y fin	***Dos tiempos*** Rampas no
	Dos tiempos especial Rampas si
Stick-out [mm]	Distancia que sale el hilo de la boquilla de la antorcha
Anchura arco → Modificación → ***Dinámico***	
Altura arco → Modificación → ***Corrección voltaje***	
Caudal de gas protector	[l/min]
WFR →	***DR*** *(siguiendo Ec. 1)*
TS	[mm/min]
Estrategia de aporte	Solape, oscilación, matricial, etc.
Input térmico	Aporte de calor [J/mm]

En primer lugar, se elige un modo de trabajo (GMAW, Cold Arc, Force Arc, etc.) de los que se tienen disponibles en cada fuente de soldadura. Estos modos de trabajo suelen ser parecidos en fuentes de soldadura de diferentes fabricantes (EWM, Fronius, etc.), aunque los presenten con diferentes nombres con pequeñas alteraciones entre cada una de ellas. Una vez elegido el modo de trabajo, dependiendo del material, del diámetro del hilo y del tipo de gas de protección se elige un modo de funcionamiento concreto (Job) que está programado en la base de datos interna de la fuente de soldadura utilizada, donde se determinan para diferentes niveles de velocidad de alimentación de hilo la forma y las características de las señales de intensidad (intensidad de base, intensidad de pico, frecuencia, etc.) que se introducirán en el hilo de soldadura para cada Job. Por ello, cada fuente de soldadura sinérgico tendrá sus propias bases de datos por lo que, para cada combinación de modo de trabajo, material, diámetro del hilo y tipo de gas de protección creará señales concretas de intensidad. Si la fuente de soldadura no es sinérgica no existirán estas bases de datos. Este aspecto se explicará más en detalle en el siguiente apartado. Una vez que el Job es elegido se debe de decidir si se quiere hacer

un proceso pulsado o estándar. Para el mismo Job se puede determinar que la señal de intensidad introducida en el hilo de soldadura tenga pulsos o no.

Además, también se debe de elegir si se quiere hacer un proceso de dos tiempos o un proceso de dos tiempos especiales. Muchas fuentes de soldadura utilizadas hoy en día tienen estas dos opciones para controlar el inicio y final de los cordones de soldadura. En el proceso dos tiempos no se utilizan rampas de inicio y fin en las señales de intensidad por lo que suele aparecer un exceso de material al inicio y una falta al final. Para un mejor control de este aspecto, se ideó la opción de dos tiempos especiales que añade rampas de inicio y fin parametrizables a las señales de intensidad introducidas para conseguir un cordón homogéneo en toda su longitud. En esta tesis se utilizará el proceso dos tiempos para toda la experimentación llevada a cabo. Se elige esta opción para reducir el número de parámetros a ensayar y porque a priori no introduce ventajas aparentes. Aun así, se prevé que en futuros estudios se deberá de analizar el proceso dos tiempos especiales determinando los mejores parámetros de rampas para cada material.

Otros de los parámetros importantes que determinar en el proceso WAAM son el Stick-out, la longitud del arco y la anchura del arco. En la Figura III-4 se puede apreciar su definición. El Stick-out es la distancia que sale el hilo de la boquilla de la antorcha. Esta distancia es controlada por la altura del robot y está estrechamente ligada con la longitud del arco, cuanto mayor es uno menor es el otro. La longitud del arco, al igual que la anchura del arco se pueden modificar ligeramente desde la fuente de soldadura. Los parámetros que se tienen que variar en la fuente de soldadura para variar los mismos, se llaman “corrección de tensión” y “dinámico”, respectivamente. Aun así, estos cambios siempre serán reducidos por lo que la corrección de tensión nunca afectará en gran medida al Stick-out. En la soldadura manual suele ser muy común que el operario vaya ajustando los valores del “dinámico” y “corrección de tensión” para conseguir una calidad de aporte óptimo. Sin embargo, en esta tesis se ha desarrollado un sistema robótico para el proceso WAAM, simplificando una adaptación del proceso de soldadura automática, por lo que los valores del “dinámico” y “corrección de tensión” se mantendrán nulos en toda la experimentación llevada a cabo.

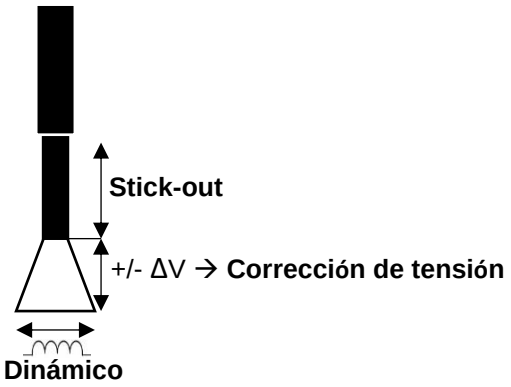


Figura III-4. Definición del Stick-out, de la longitud del arco y de la anchura del arco

Por último, para cuantificar la productividad de los procesos WAAM es muy utilizado el término, tasa de aporte *(Deposition Rate, DR*) que se calcularía según la Ec. 1 siendo WFR la velocidad de alimentación de hilo, d el diámetro del hilo y ρ la densidad del material.

$$DR = WFR * \pi * \frac{d^2}{2} * \rho \quad (1)$$

4 Modos de trabajo sinérgicos de la fuente de soldadura Titan XQ 400 AC puls (EWM)

La soldadura GMAW sinérgica es una variante de la soldadura GMAW común y en la actualidad, es el método más utilizado en las fuentes de soldadura avanzadas. Las fuentes de soldadura sinérgica GMAW (en esta tesis la máquina Titan XQ 400 AC puls; EWM) tienen una fuente de energía manipulada digitalmente que crea señales de intensidad que se introducen en los hilos de soldadura para crear el arco eléctrico que fundirá el material. Como ya se ha nombrado, se puede elegir que estas señales de intensidad sean pulsadas o estándares. En las señales pulsadas, en cada uno de los pulsos, se libera una gota idéntica de material fundido del hilo al sustrato (Figura III-6) con un volumen dependiente del diámetro del hilo [Kah, 2013]. Estos pulsos, combinados con una relación particular entre los parámetros del proceso, aseguran una fusión estable del hilo. En cambio, en todos los casos, en el proceso GMAW la señal de tensión impuesta por la intensidad se mantiene cerca de un valor constante.

Dependiendo del modo de trabajo elegido, la fuente de soldadura GMAW sinérgica creará señales de intensidad con diferentes formas de onda que se introducen en el hilo de soldadura. Esta forma de la señal de intensidad no solo depende del modo de trabajo elegido, también depende del material, del tipo de gas protector y del diámetro del hilo. De esta manera, habiendo establecido el

modo de trabajo y los parámetros antes mencionados se determina el Job. Como se ha nombrado previamente, dependiendo del Job elegido las fuentes de soldadura sinérgicas tienen bases de datos internas, donde se determinan para diferentes niveles de velocidad de alimentación de hilo las características de la señal de intensidad que se introduce en el hilo. Entre estas características se pueden definir la intensidad de base, intensidad de pico, frecuencia, etc. Por ejemplo, para aceros con el modo de trabajo GMAW con gas de protección 20% CO_2 - 80% Ar y diámetro de hilo de 1,2 mm el Job correspondiente, para el generador utilizado en esta tesis, sería el Job 9. Los diferentes Job-s, que resumiendo son bases de datos internos de las fuentes de soldadura que incluyen las características de la forma de la señal de intensidad a aplicar en el material introducido en el proceso, van nombrados por números. Cada fabricante de fuentes de soldadura suministra la lista de los Job-s disponibles en cada generador. Una vez que el Job esté determinado, la forma de la señal de intensidad a introducir en el hilo de soldadura para crear el arco eléctrico depende únicamente del valor de la velocidad de alimentación de hilo establecida, modificando automáticamente los valores de las características de pulso dependiendo del valor de la velocidad de alimentación de hilo introducido.

La automatización de la elección de estas características en función de la velocidad de alimentación de hilo se realiza mediante el diseño de un algoritmo que contempla rutinas de cálculo y una base de datos interna con la información del material involucrado. Esto es exactamente lo que significa que las fuentes de soldadura sean sinérgicas, es decir, que tengan introducidas bases de datos por los que alimentarse para determinar la forma de la señal de intensidad según las especificaciones introducidas (Job y WFR).

Este control sinérgico de las características de pulso garantiza un perfil y una penetración uniformes del cordón de soldadura. En comparación, la principal desventaja de los conjuntos no sinérgicos es que requieren la configuración individual de las características de pulso para cada valor de velocidad de alimentación de hilo dada. De esta manera, la fuente de soldadura Titan XQ 400 AC puls (EWM) tiene cuatro modos de trabajo principales, cada uno para una aplicación concreta con una trasferencia de material adecuada: GMAW estándar/pulsado, Cold Arc, Force Arc estándar/pulsado y AC pulsado.

Por un lado, los modos de trabajo GMAW estándar/pulsado son modos comunes y ampliamente utilizados, disponibles para altas tasas de aporte (para aceros, por ejemplo, los valores de velocidad de alimentación de hilo posibles son de 1,5 a 16 m/min). Las señales que se han obtenido para los modos GMAW estándar y pulsado para aceros con gas de protección 20% CO_2 - 80% Ar y diámetro de hilo de 1,2 mm (Job 9) con valores de velocidad de

alimentación de hilo de 5 m/min se pueden ver en la Figura III-5. Estas señales y el resto de las señales adquiridas a alta frecuencia durante esta tesis se han recogido con el sistema de adquisición Oros OR35 (Oros, France) y el software NVGate a 12,8 kHz.

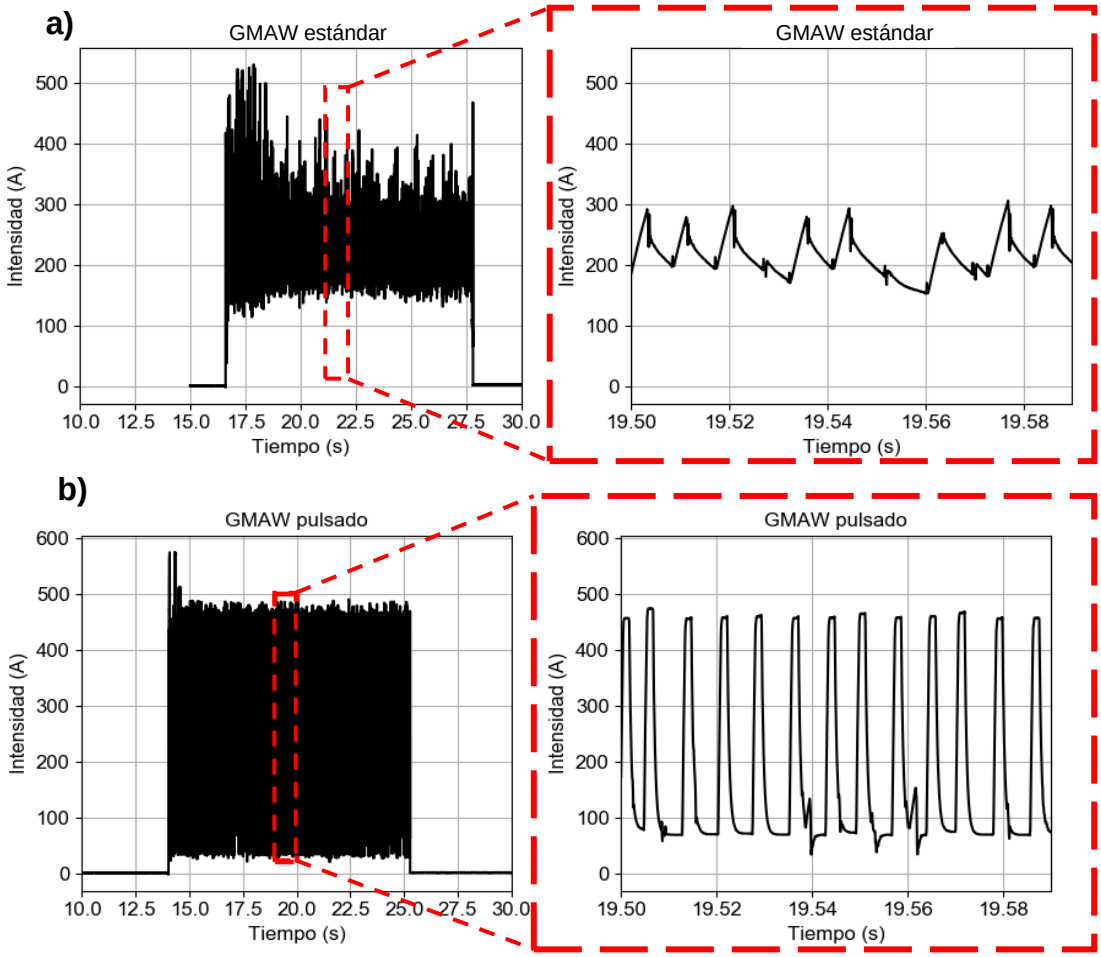


Figura III-5. Señal de intensidad para el modo GMAW a) estándar y b) pulsado en aceros con gas de protección 20% CO_2 - 80% Ar, diámetro de hilo de 1,2 mm (Job 9) y valores de velocidad de alimentación de hilo de 5 m/min

El modo GMAW estándar transfiere el material de una forma un tanto errática en regiones entre transferencia globular y spray. En cambio, la señal de intensidad en el modo GMAW pulsado está compuesto por pulsos de alta frecuencia que provocan que una gota de material fundido se transfiera en cada pulso de forma controlada. Esto genera un suministro térmico menor y menos salpicaduras. Por lo tanto, en esta tesis y en futuros estudios se recomienda utilizar siempre los modos pulsados en procesos de fabricación WAAM basados en GMAW para poder obtener un mayor control del proceso de transferencia del material.

Por ejemplo, la Figura III-6 muestra la forma teórica de la señal de intensidad que se ha obtenido interpolando de la base de datos diseñada por EWM para el modo de trabajo GMAW pulsado en aceros con gas de protección 20% CO_2 - 80% Ar, diámetro de hilo de 1,2 mm (Job 9) y velocidad de alimentación de hilo de 8 m/min. La frecuencia de formación de gotas en este caso es de 138,2 Hz (dato extraído de la base de datos interna de EWM). Esta figura también muestra el proceso de formación de gotas y su correlación con la señal de intensidad.

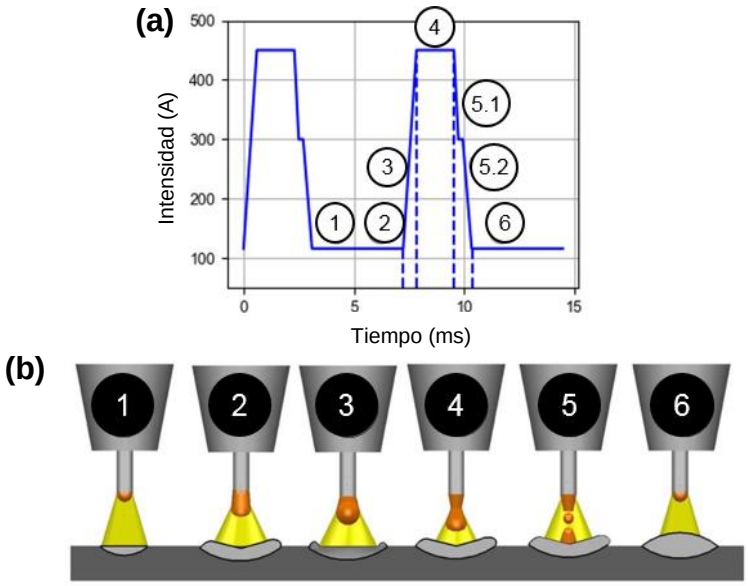


Figura III-6. (a) Forma de la señal de intensidad teórica para el modo de trabajo GMAW pulsado en aceros con gas de protección 20% CO_2 - 80% Ar, diámetro de hilo de 1,2 mm (Job 9) y velocidad de alimentación de hilo de 8 m/min. (b) El proceso de formación de gota y su correlación con la señal de intensidad

Con estos mismos parámetros, la señal real de alta frecuencia que se ha adquirido directamente desde la fuente de soldadura se puede ver en la Figura III-7. Como se puede observar, la intensidad asciende con pendiente controlada hasta llegar a la intensidad de pico en la que se forma la gota, esta intensidad cae deteniéndose en una intensidad intermedia por un corto período de tiempo hasta llegar a la intensidad base en la que libera la gota. El período de la onda es de 7,23 ms, lo que produce una frecuencia de aporte de gotas de 138,2 Hz, similar a la comandada mediante la base de datos.

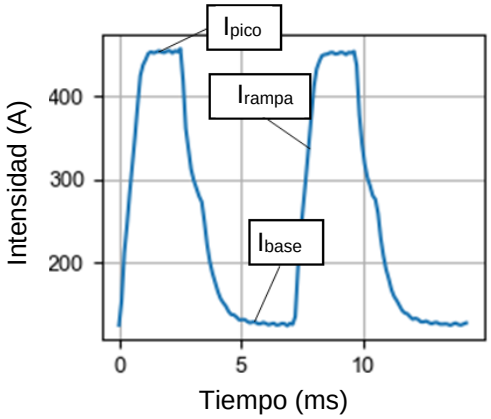


Figura III-7. Señal de intensidad real para el modo de trabajo GMAW pulsado en aceros con gas de protección 20% CO_2 - 80% Ar, diámetro de hilo de 1,2 mm (Job 9) y velocidad de alimentación de hilo de 8 m/min

Por otro lado, el modo Cold Arc, diseñado y presentado por la empresa EWM, transfiere el material de manera controlada mediante procesos de corto circuito. Es un proceso de baja tasa de aporte con valores de velocidad de alimentación de hilo bajos, por ejemplo, para aceros de 1 m/min a 5 m/min. De esta manera, se obtiene un proceso sencillo con bajo suministro térmico. Por ello, es adecuado para la fabricación de piezas con paredes muy delgadas como la que se ve en la Figura III-8.

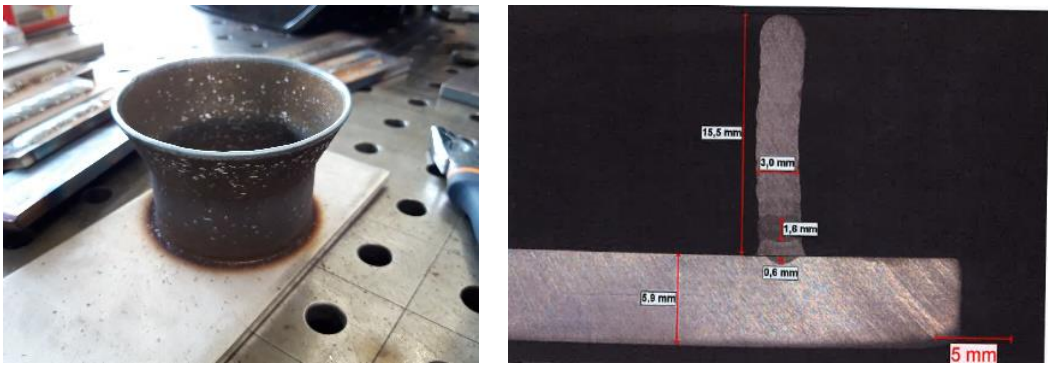


Figura III-8. Vaso con pared fina de 3 mm fabricado mediante el modo Cold Arc en acero inoxidable con hilo de diámetro 1 mm

Este proceso Cold Arc ya lleva incorporado el pulso, por lo que no hay que habilitar la opción del pulsado. Si se habilita ya no se tiene el proceso Cold Arc sino el proceso GMAW pulsado. En la Figura III-9 se puede apreciar la señal de intensidad del modo Cold Arc para aceros con gas de protección 20% CO_2 - 80% Ar, diámetro de hilo de 1,2 mm (Job 194) y velocidad de alimentación de hilo de 5 m/min.

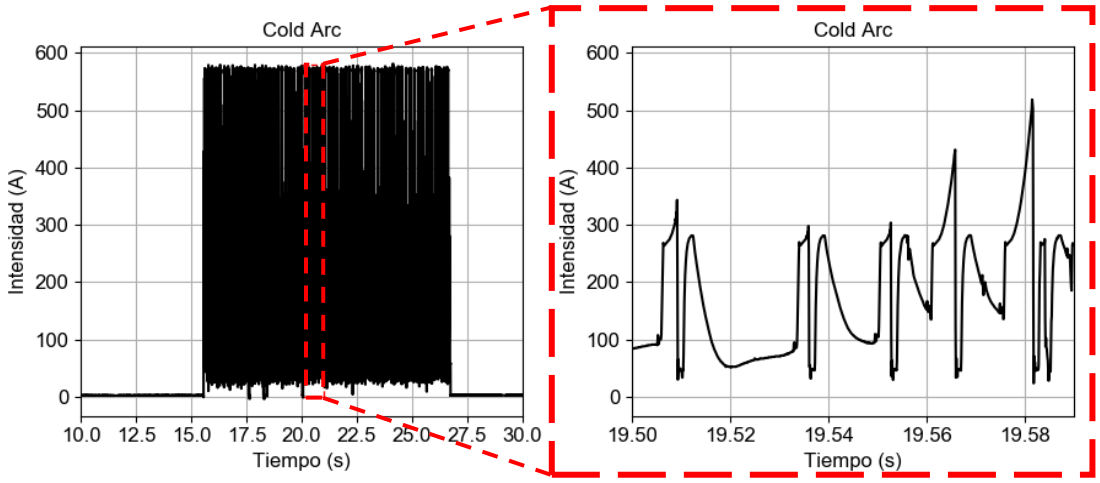


Figura III-9. Señal de intensidad para el modo Cold Arc en aceros con gas de protección 20% CO_2 - 80% Ar, diámetro de hilo de 1,2 mm (Job 194) y velocidad de alimentación de hilo de 5 m/min

El modo Force Arc estándar o pulsado, por su parte, se utiliza para tasas de aporte altas (para aceros, WFR posibles de 1,5-18 m/min) con arco voltaico de alta presión. De esta manera, se obtiene alta estabilidad direccional y la penetración suele ser profunda y concentrada. El modo Force Arc no se ve adecuado para el proceso WAAM porque suministra mucho calor en el sustrato y se relegaría para procesos de soldadura o la fabricación de las primeras capas en WAAM cuando se necesita una alta penetración. Como en el caso del modo GMAW estándar y pulsado también en este caso se recomienda la utilización del modo pulsado por el mayor control del proceso. En la Figura III-10 se pueden observar en aceros, con gas protector 20% CO_2 - 80% Ar, diámetro de hilo de 1,2 mm (Job 180) y velocidad de alimentación de hilo de 5 m/min, las señales de Force Arc estándar y pulsado.

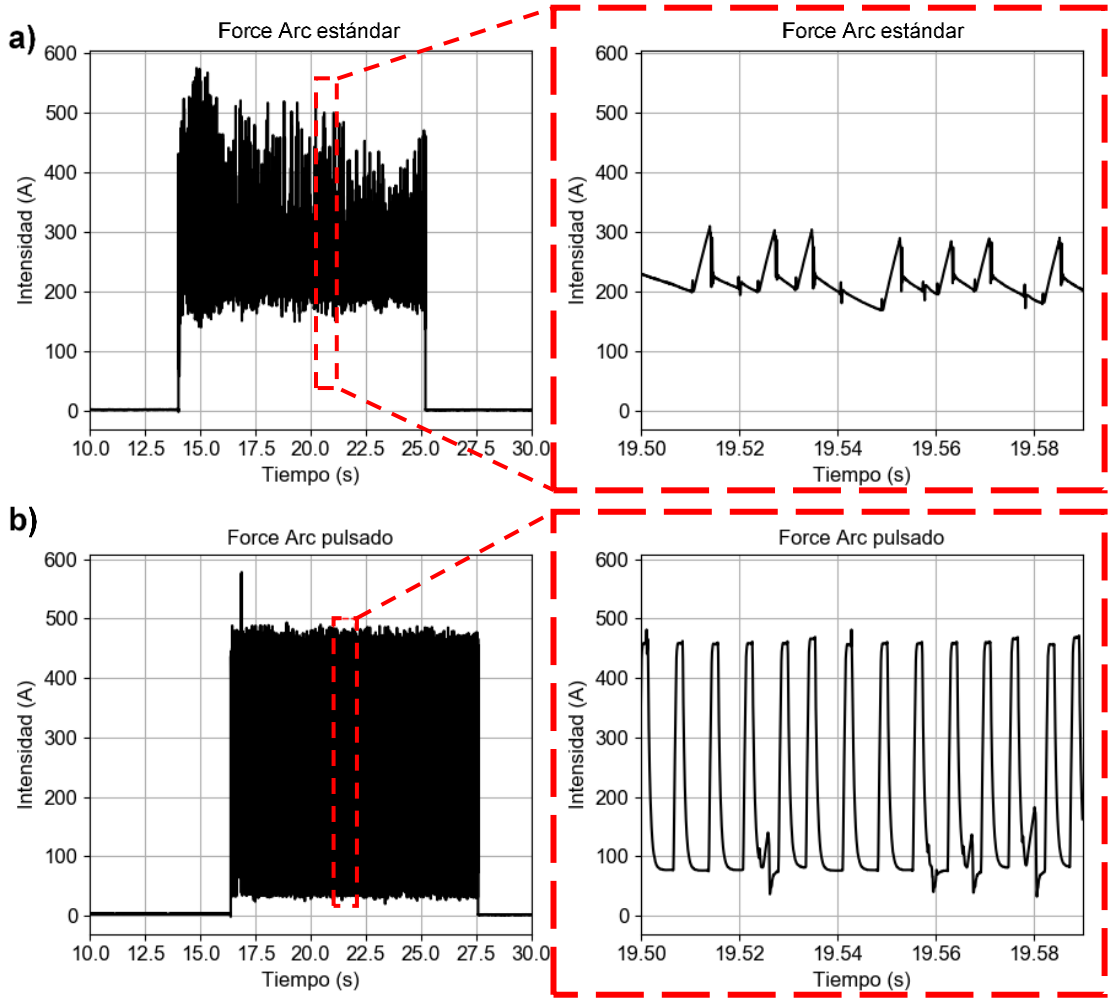
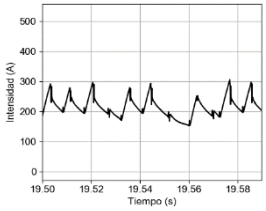
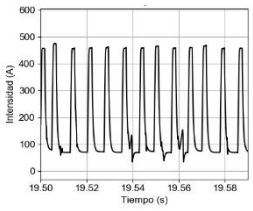
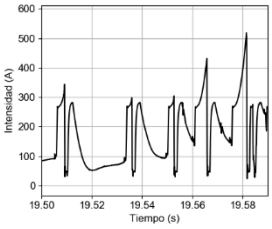
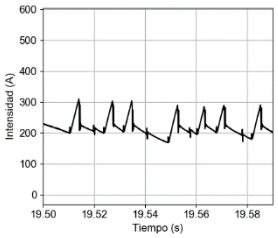
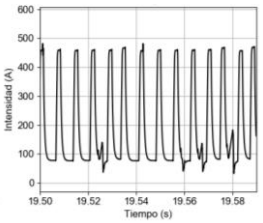


Figura III-10. Señal de intensidad para el modo Force Arc a) estándar; b) pulsado en aceros con gas de protección 20% CO_2 - 80% Ar, diámetro de hilo de 1,2 mm (Job 180) y velocidad de alimentación de hilo de 5 m/min

Por último, en el proceso AC pulsado la señal de intensidad tiene polaridad variable con altas tasas de aporte. Este proceso solo está indicado para soldaduras de aluminio y siempre se llevará a cabo en modo pulsado. Los valores de velocidad de alimentación de hilo que permite la fuente de soldadura Titan XQ 400 AC puls (EWM) para este modo en aleaciones de aluminio Al-Mg van desde 2 a 12 m/min. Este modo se explica en el capítulo V, en detalle.

Para concluir, en la Tabla III-2 se presenta un resumen de los principales modos de trabajo utilizados para aceros en la fuente de soldadura Titan XQ 400 AC puls (EWM).

Tabla III-2. Principales modos de trabajo para aceros disponibles en la fuente de soldadura Titan XQ 400 AC puls (EWM)

Modo de trabajo	Material	Tipo de gas	Ø de hilo	Job	Estándar	Pulsado
GMAW	Acero	20% CO_2 - 80% Ar	1,2	9		
Cold Arc		20% CO_2 - 80% Ar	1,2	194		-
Force Arc		20% CO_2 - 80% Ar	1,2	180		

5 Desarrollo del control de altura

En el proceso WAAM basado en GMAW la distancia que se tiene de la antorcha a la pieza a fabricar es de vital importancia ya que esta altura va a influenciar los valores de intensidad obtenidos y también la estabilidad y la idoneidad del arco. Esto se ha concluido gracias a tres estudios que se han realizado previamente que se exponen como antecedentes. En estos tres estudios se ha utilizado el acero ER70S-6 como material de aporte (analizado profundamente en el capítulo IV) y el modo de soldadura utilizado ha sido el GMAW pulsado.

Para controlar esta distancia, se ha desarrollado un control de altura que ajusta la altura del robot para que la intensidad durante el proceso sea la intensidad deseada. Si no se aplica ningún control, el crecimiento por capa de cada material con cada conjunto de parámetros se debería de tener muy bien caracterizado. De esta manera, con la utilización del control se puede asegurar una integridad metalúrgica adecuada del material y una menor probabilidad de obtención de fallos como faltas de llenado o porosidades. Además, permite que la programación de las piezas a fabricar sea mucho más sencilla ya que no se

requiere del conocimiento exacto del crecimiento por capa de cada material con los parámetros utilizados.

5.1 Antecedentes

En primer lugar, ya que se intuía que el Stick-out tenía una gran influencia en el proceso de aporte se ha hecho un estudio analizando este aspecto. Se han fabricado cordones a 8 m/min y 16 m/min de velocidad de alimentación de hilo con diferentes Stick-outs (15, 17, 20 y 22 mm). La velocidad de avance en todos los casos ha sido de 650 mm/min. Las señales de intensidad que se han adquirido a alta frecuencia para velocidad de alimentación de hilo de 8 m/min y diferentes Stick-outs se pueden apreciar en la Figura III-11.

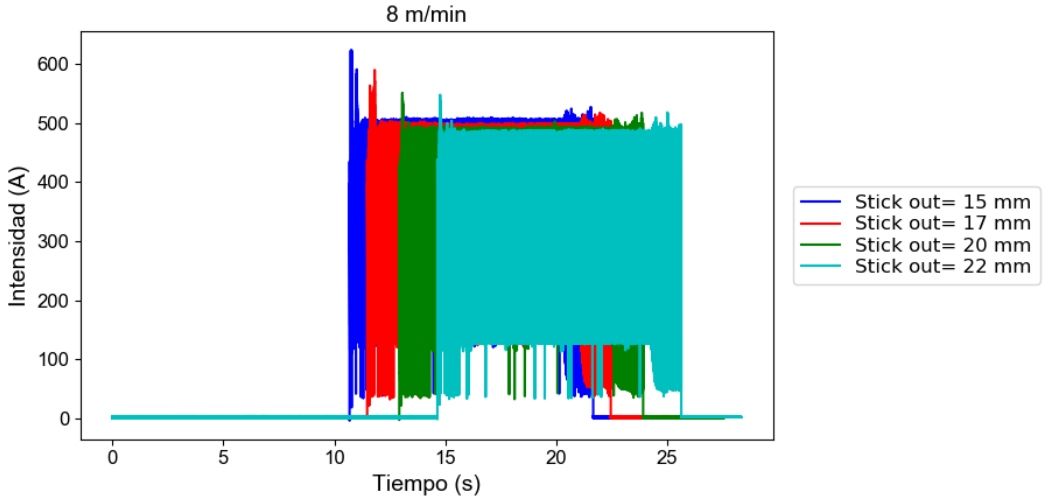


Figura III-11. Señales de intensidad de la fabricación de cordones con WFR=8 m/min y diferentes Stick-outs

Como se observa claramente los valores de pico de los pulsos de intensidad aumentan cuando disminuye el Stick-out. También, se aprecia que la frecuencia de la señal de intensidad cambia según el Stick-out; cuanto menor sea el Stick-out mayor es la frecuencia como se observa en la Figura III-12.

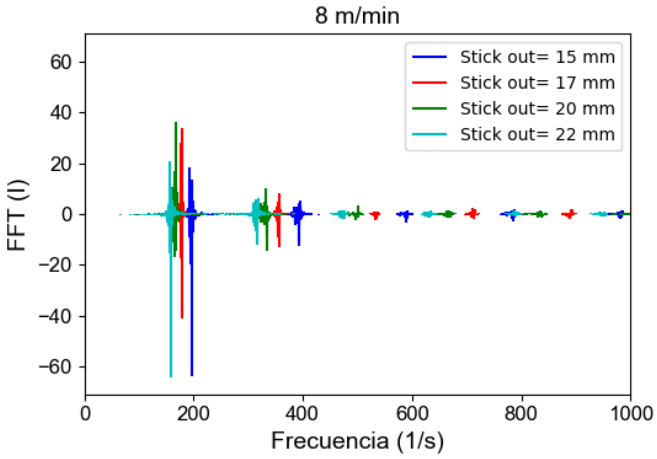


Figura III-12. Gráfica FFT de las señales de intensidad de la fabricación de los cordones con WFR=8 m/min y diferentes Stick-outs

Se aprecian los mismos efectos en las señales adquiridas en los cordones fabricados a velocidad de alimentación de hilo de 16 m/min como se observa en la Figura III-13.

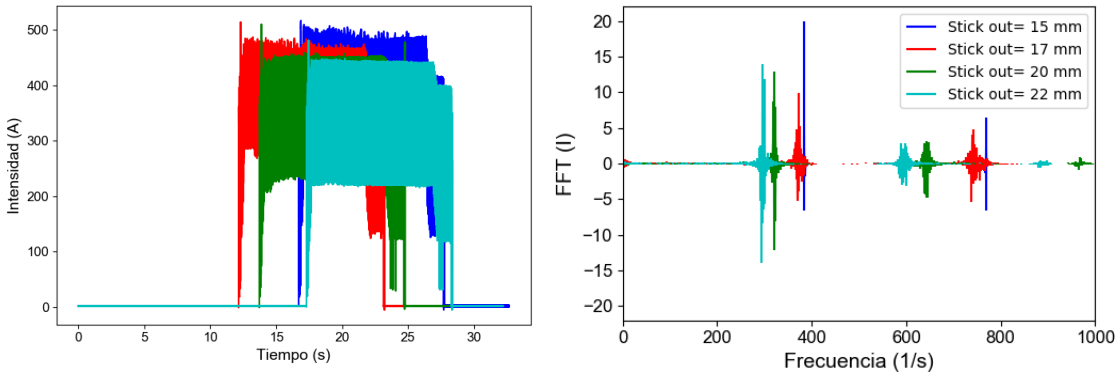


Figura III-13. Señales de intensidad y sus gráficas FFT adquiridas durante la fabricación de cordones con WFR=16 m/min y diferentes Stick-outs

En segundo lugar, se han fabricado simultáneamente 5 paredes solapadas triples de 230 x 23 x 105 mm y 60 capas. Durante esta fabricación se han adquirido las señales de intensidad a alta frecuencia. Tal y como se puede observar en la Figura III-14, se ha creado una ondulación en el sustrato a causa del calor suministrado en las paredes. Esta ondulación ha supuesto que el Stick-out no haya sido constante, siendo más pequeño en los extremos de la pared que en el centro de la misma.



Figura III-14. Durante la fabricación de las 5 paredes la ondulación del sustrato

La reducción de este Stick-out aumenta el valor de pico de la intensidad y la frecuencia de pulsado. Como se puede observar en la Figura III-15, se muestra la señal de intensidad de la capa 23 y cada pico representa cada cordón aportado. Se aprecia que en los extremos los valores de la intensidad de pico son mayores y en el centro en cambio menores ya que el Stick-out es menor en los extremos que en el centro.

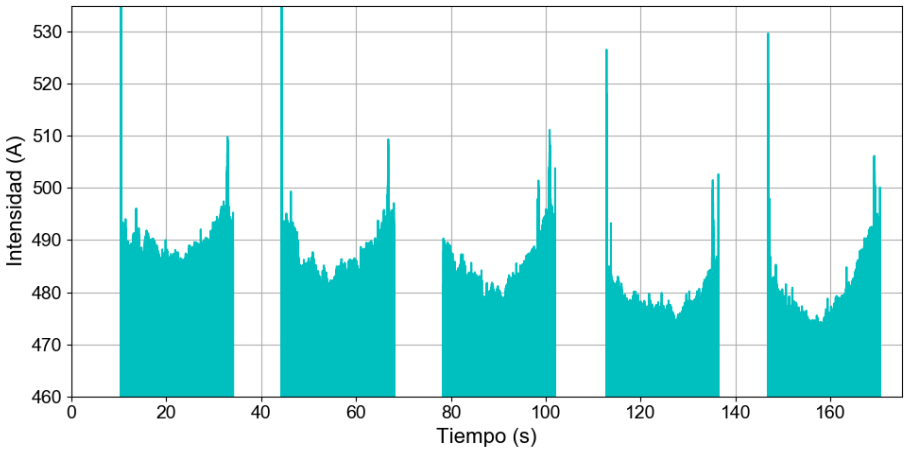


Figura III-15. Parte de la señal de intensidad adquirida durante la fabricación de la capa 23 de las 5 paredes solapadas triples

Por último, para poder apreciar el error que podría generar una mala elección de la altura de capa supuesta, se han fabricado dos paredes simples. Una con crecimiento por capa constante de 2 mm y la otra ajustando la altura según el crecimiento real medido mediante el escáner láser situado en la antorcha de soldadura. Para este último caso, después de fabricar cada capa, la pared se ha escaneado, se han visualizado los datos obtenidos y el operario ha elegido

donde se aportará la siguiente capa. En la primera pared, en cambio, se ha establecido un crecimiento de capa constante de 2 mm para toda la pared.

Como se aprecia en los resultados obtenidos (Figura III-16) después de que la velocidad de alimentación de hilo se ponga a 8 m/min, la intensidad se estabiliza en el caso de la pared en la que la altura de capa se ajusta mediante el escáner láser. En el caso de la pared de crecimiento constante, en cambio, la intensidad va disminuyendo ya que la distancia desde la antorcha hasta la última capa es cada vez mayor. Es decir, porque el Stick-out es cada vez mayor.

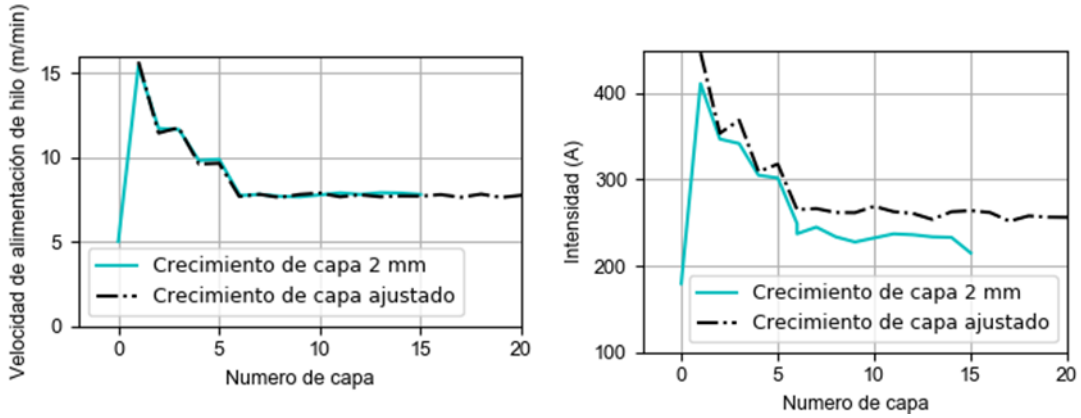


Figura III-16. Valores medios de (a) velocidad de alimentación de hilo y (b) intensidad del 60% central del cordón aportado por capa

5.2 Descripción del control de altura

Con estos tres ejemplos queda al descubierto la necesidad de un control de altura para la fácil programación y fabricación controlada mediante la tecnología WAAM basado en GMAW. Este control ajusta la altura del robot para que la intensidad durante el proceso sea la intensidad consignada para cada conjunto de parámetros y materiales. Si no se aplica ningún control, el crecimiento por capa de cada material con cada conjunto de parámetros se debe de tener muy bien caracterizado. De esta manera, la programación de piezas es más fácil y además, la posibilidad de generar defectos en el material como poros, faltas de llenado, etc. es más bajo.

Por ello, se ha añadido un control de altura al sistema robótico que se ha desarrollado a lo largo de esta tesis para la tecnología WAAM basado en GMAW. Este control según una intensidad consignada ajusta la altura del robot para conseguir un aporte óptimo. El control de altura se lleva a cabo mediante el controlador *Dynamic Path Modification* (DPM) de Fanuc que permite corregir las posiciones del robot en tiempo real. El control que se ha instalado es un

control proporcional y corrige la posición de la herramienta del robot a lo largo de la trayectoria.

Para ello, durante el aporte se almacenan los valores medios de la intensidad en un buffer de 10 valores y se calcula la media. Esta media se compara con la intensidad de consigna y si la intensidad media es mayor o menor a la consignada se ajusta la altura del robot según la Ec. 2:

$$z_{correccion} = \frac{I_{consigna} - I_{media}}{20} * kp \quad (2)$$

donde, kp es el valor de la ganancia proporcional, la $I_{consigna}$ la intensidad consignada y I_{media} la intensidad media de los valores instantáneos almacenados en el buffer de 10 valores. El buffer se va refrescando a medida que se va aportando y la media se va recalculando y comparando con la intensidad de consigna, ejecutándose así el proceso de forma continua.

El valor consignado de la intensidad es dependiente del Job elegido y del valor de la velocidad de alimentación de hilo. Primero, según el material a aportar, el diámetro del hilo utilizado, del tipo de gas de protección y del modo de trabajo se elige un Job concreto de la fuente de soldadura. Después, se introduce la velocidad de alimentación de hilo. Por lo tanto, según el Job y la velocidad de alimentación de hilo elegidos queda establecida la forma de la señal de intensidad gracias a que la fuente es sinérgica, es decir, gracias a que tiene bases de datos y reglas de cálculo internos para determinar las características (forma) de la señal de intensidad. Por ello, el valor medio teórico de esta señal de intensidad también es sabida. De esta manera, para cada Job se han podido obtener gráficas teóricas que representan la intensidad media según la velocidad de alimentación de hilo establecida (Figura III-17).

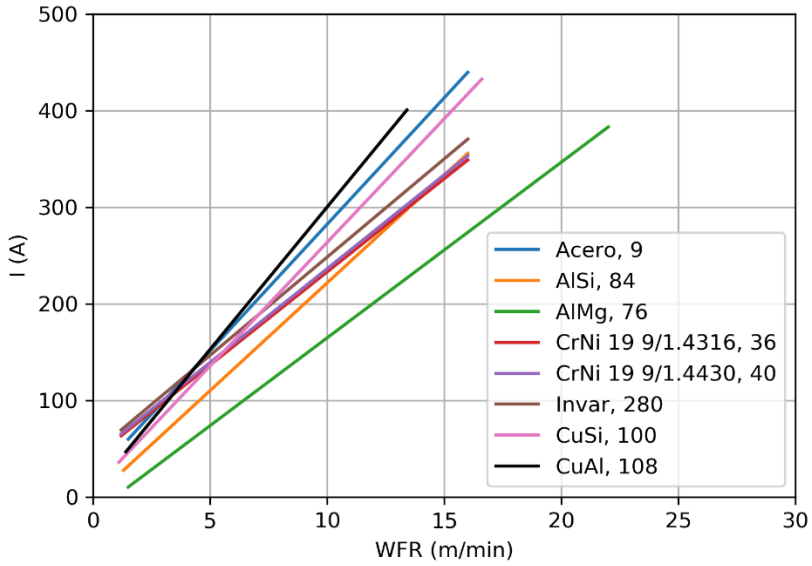


Figura III-17. Relación entre WFR e intensidad en los diferentes Jobs que utilizan el modo de trabajo GMAW pulsado en diferentes materiales. Téngase en cuenta que en la leyenda se resume el material y el Job

Se dice que estas gráficas son teóricas porque durante el proceso real de fabricación, según algunos factores (mayoritariamente el Stick-out) la señal de intensidad puede variar ligeramente y por lo tanto, también el valor medio de esta. En la Figura III-18 se puede observar la gráfica teórica del Job 9 y los valores de intensidad reales que se han obtenido en cordones únicos fabricados con diferentes velocidades de alimentación de hilo. Como se observa, estos valores se ajustan a la recta teórica, aunque varían ligeramente debido a los diferentes aspectos que afectan a la fabricación real.

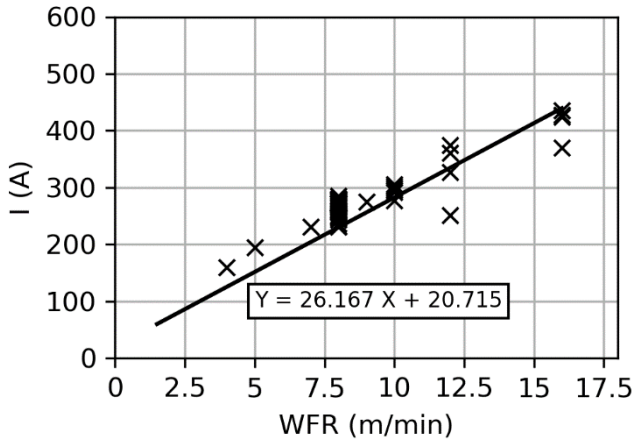


Figura III-18. Recta teórica del Job 9 y los valores reales de intensidad media en cordones únicos fabricados con este Job

Partiendo de estas gráficas teóricas y mediante la utilización de la regresión lineal se han obtenido ecuaciones de primer orden que representan esta

relación (ver ecuación de la Figura III-18). De esta forma, el control de altura incorpora estas ecuaciones que relacionan la velocidad de alimentación de hilo con la intensidad media para los diferentes Jobs de la fuente de soldadura Titan XQ 400 AC puls (EWM), las cuales se han adaptado para el proceso WAAM.

De esta manera, al empezar el proceso de aporte en otro buffer de 10 valores se almacenan los valores de velocidad de alimentación de hilo instantáneas (se almacena un valor cada 100 ms). Con estos valores se calcula la media, que se introduce en la ecuación obtenida para el Job elegido y se obtiene la intensidad de consigna que alimenta el control de altura. El buffer, a medida que se va aportando el material, va refrescando los datos y la media se va recalculando para luego actualizar el valor de la intensidad consignada. Así, si durante el proceso se cambia la velocidad de alimentación de hilo consignada, los valores del buffer se irían actualizando hasta que la media de estos diera el valor nuevo introducido. Con este nuevo valor se recalcularía la intensidad consignada al control de altura y de esta manera, el robot ahora seguiría ajustando la altura según la nueva intensidad de consigna. El diagrama de este control se puede observar en la Figura III-19.

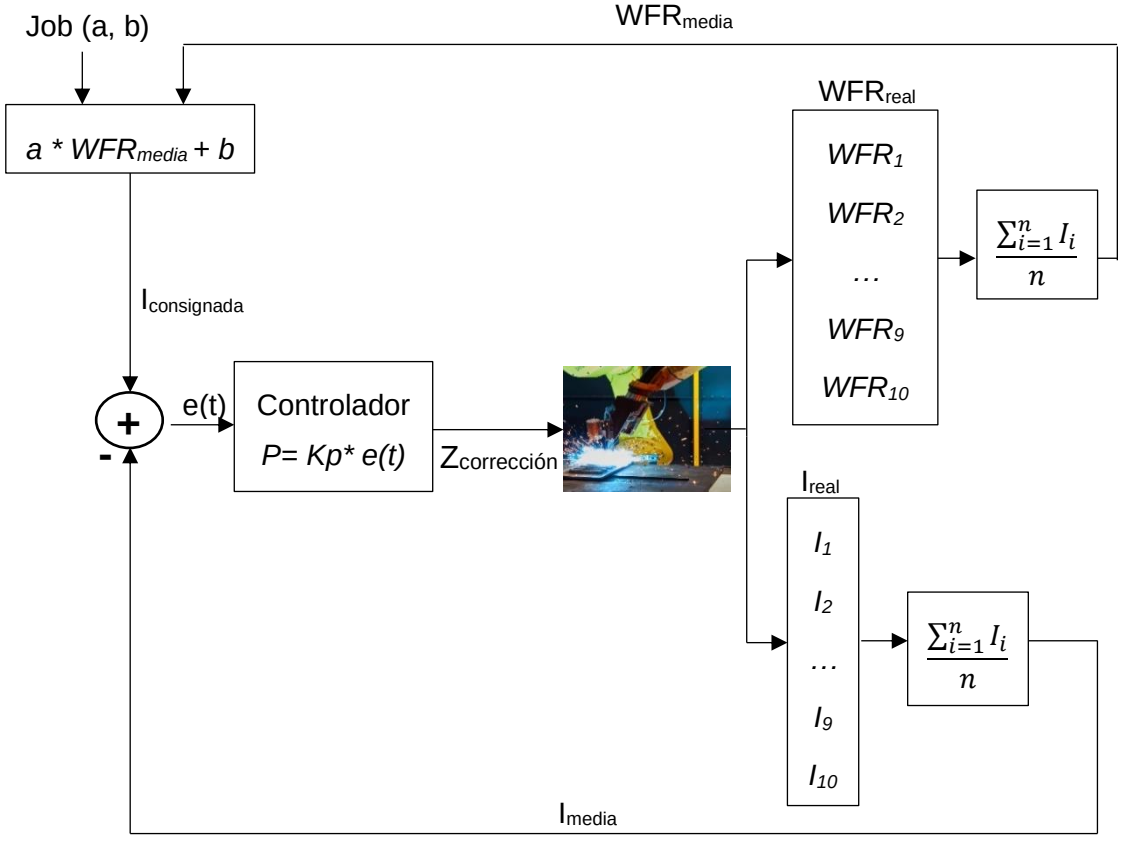


Figura III-19. Diagrama del control de altura

5.3 Validación del control de altura: fabricación de un vaso simple

Para la validación del control de altura se ha fabricado un vaso simple, es decir, de un único cordón en cada capa, utilizando hilo de diámetro 1,2 mm de acero dulce ER70S-6 y como sustrato se han utilizado placas planas de acero S235JR de 12 mm. El modo de trabajo seleccionado ha sido el GMAW (Job 9) pulsado y el gas de protección el 20% CO_2 -80% Ar con un caudal de 17 l/min. El Stick-out ha sido de 15 mm y la velocidad de avance de 1740 mm/min. La fabricación del vaso ha sido realizada de forma continua y sin paradas de enfriamiento.

En este vaso solamente se ha programado la trayectoria de la primera capa y luego se ha repetido esta trayectoria con la altura que ha establecido el control según las señales de intensidad que ha recibido. En este control, por razones de seguridad, el límite de ascenso desde la posición donde se está se ha establecido en 3 mm para cada capa y ha sido posible de esta manera fabricar un vaso infinito con la seguridad de que el robot no vaya a superar nunca este límite. Por lo tanto, con este control, se puede aportar material sin tener que estimar a priori el crecimiento por capa porque el control decide cuanto va subiendo el robot en cada punto para mantener la intensidad calculada según el Job seleccionado. Mediante la experimentación, se ha concluido que una ganancia proporcional (kp) adecuada para el control en el robot antropomórfico utilizado es -0,3.

Además, para asegurar el correcto funcionamiento del control durante la fabricación del vaso, la velocidad de alimentación de hilo consignada se ha cambiado de 10 m/min a 6 m/min y luego a 4 m/min como se observa en la Figura III-20 a. En consecuencia, la intensidad ha cambiado de igual manera (Figura III-20 b). En la Figura III-20 c, se puede observar la evolución de lo que se ha desplazado el robot en el eje Z durante la fabricación del vaso. El robot ha ido ajustando la altura gracias al control según los cambios en la velocidad de alimentación de hilo y, en consecuencia, en la intensidad que se han dado durante el proceso.

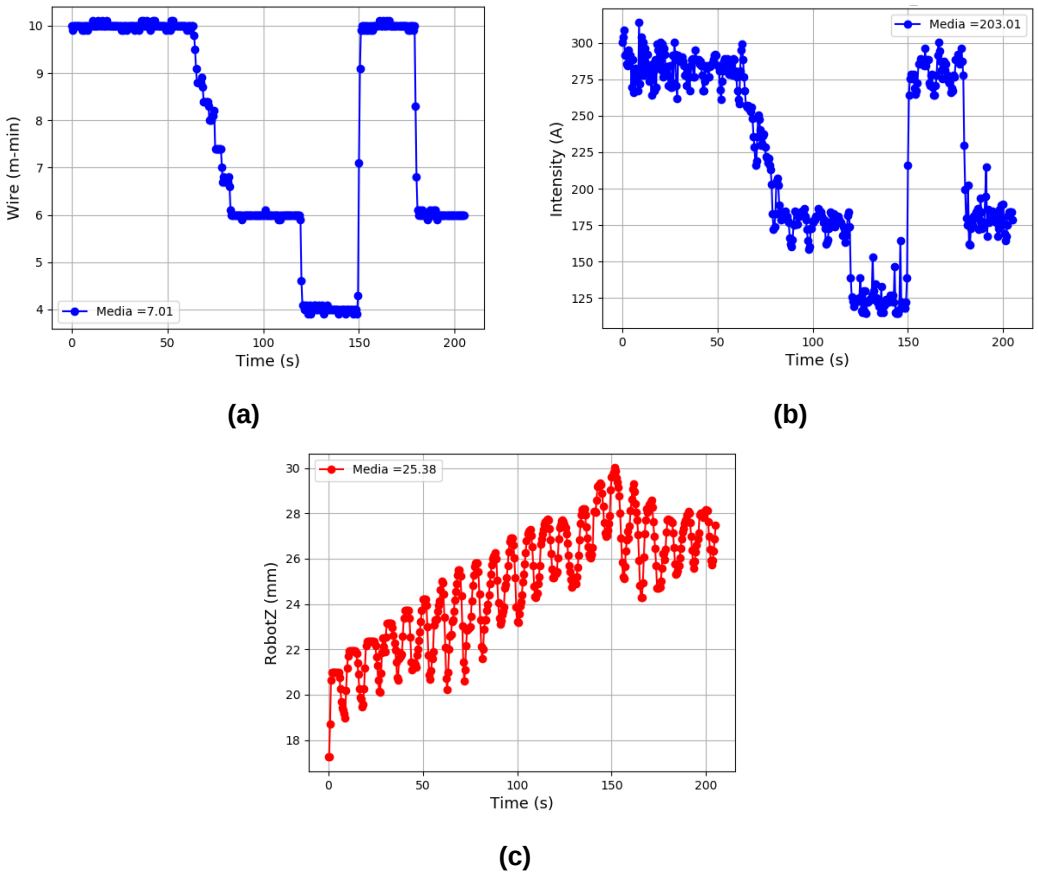


Figura III-20. (a) WFR, (b) intensidad y (c) altura del robot monitorizados durante la fabricación del vaso de validación

Gracias al control se ha fabricado un vaso adecuado que se puede apreciar en la Figura III-21, de manera infinita sin tener ningún conocimiento previo del crecimiento por capa, lo que en cuanto a diseño de trayectorias en algunas piezas puede reducir considerablemente el trabajo a llevar a cabo. Además, mediante este control se puede asegurar la calidad del material aportado.

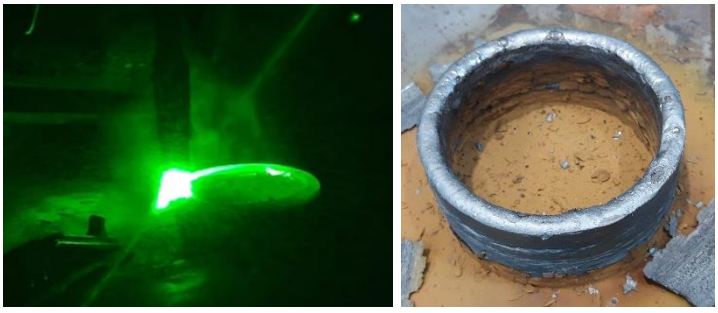


Figura III-21. Vaso fabricado para la validación del control de altura

6 Conclusiones

En este capítulo, se ha descrito el desarrollo de un sistema robótico para la fabricación de piezas mediante la tecnología WAAM basado en GMAW. Inicialmente, se ha detallado el set-up utilizado y los sistemas de comunicación que se han introducido entre los diferentes componentes, además del sistema de monitorización de los parámetros de aporte. En segundo lugar, se han definido los parámetros ajustables del proceso GMAW y se han analizado los principales modos de trabajo de la fuente de soldadura Titan XQ 400 AC puls (EWM): GMAW estándar/pulsado, Cold Arc, Force Arc estándar/pulsado y AC pulsado. Por último, se ha diseñado un control de altura para el sistema robótico creado en esta tesis. Estas han sido las conclusiones principales que se han extraído de este desarrollo:

- El sistema robótico desarrollado es válido para la fabricación de piezas mediante la tecnología WAAM basado en GMAW. La elección de un robot antropomórfico para este fin es interesante por su versatilidad y coste económico. Además, los dos instrumentos de control y monitorización instalados en la antorcha de soldadura (pirómetro y escáner láser) se han instalado adecuadamente en el desarrollo y se ha creado un sistema de fácil manejo para el operario. Por último, mediante el sistema creado es posible monitorizar los principales datos de proceso y los datos adquiridos mediante los instrumentos de control para su posterior análisis.
- Se ha definido el funcionamiento de una fuente de soldadura sinérgica. Las fuentes de soldadura sinérgica según bases de datos y reglas de cálculo internas dependiendo del Job introducido (dependiente a su vez del material, del tipo de gas de protección, del diámetro del hilo y del modo de trabajo elegidos) y de la velocidad de alimentación de hilo, generan señales de intensidad que se introducen en los hilos de soldadura para crear el arco eléctrico que funde el material para fabricar la pieza deseada. La forma de esta señal de intensidad es dependiente de todo lo nombrado anteriormente y una vez determinado el Job se rige solamente por la velocidad de alimentación de hilo. De esta manera, no se tiene que parametrizar la forma de la señal de intensidad para todas las combinaciones de parámetros posibles y se asegura un perfil y una penetración uniformes del cordón de soldadura.
- La fuente de soldadura utilizada en esta tesis, la Titan XQ 400 AC puls (EWM), tiene cuatro modos de trabajo principales. Otras fuentes de soldadura de otras compañías tienen modos de trabajo ligeramente diferentes pero análogos:

- ❖ En primer lugar, el modo GMAW pulsado es un proceso de alta tasa de aporte que trasfiere una gota de material fundido en cada pulso de forma controlada. En comparación, el proceso GMAW estándar transfiere el material de una forma un tanto errática en regiones entre transferencia globular y spray. Por lo tanto, en esta tesis y en futuros estudios se recomienda utilizar siempre los modos pulsados en procesos de fabricación WAAM basados en GMAW para poder obtener un mayor control del proceso. Concluyendo, el modo GMAW pulsado, en general, es el más indicado para la fabricación WAAM en diversos materiales excepto en aleaciones de aluminio.
- ❖ Por otro lado, el modo Cold Arc con bajas tasas de aporte transfiere el material mediante corto circuitos, obteniendo un proceso con bajo suministro térmico. Por razones de productividad solo es adecuado para la fabricación de piezas con paredes muy delgadas.
- ❖ Los modos Force Arc estándar o pulsado, por su parte, se utilizan para altas tasas de aporte con arco voltaico de alta presión. De esta manera, se obtiene alta estabilidad direccional y la penetración suele ser profunda y concentrada. Como en el caso del modo GMAW estándar y pulsado también en este caso se recomienda la utilización del modo pulsado por el mayor control del proceso. Resumiendo, el modo Force Arc no se ve adecuado para el proceso WAAM por el excesivo suministro térmico que produce y se relegaría para procesos de soldadura o la fabricación de las primeras capas en WAAM cuando se necesita una alta penetración.
- ❖ Por último, en el proceso AC pulsado la señal de intensidad tiene polaridad variable con altas tasas de aporte. Este proceso solo está indicado para soldaduras y procesos WAAM en aluminio por las buenas propiedades del material que obtiene (Se realizará un estudio en detalle en el capítulo V).

- En el proceso WAAM basado en GMAW la intensidad del proceso puede ser controlada mediante la distancia entre la antorcha y la pieza. A este control se le ha llamado control de altura. Es decir, teniendo una intensidad de consigna adecuada para el proceso de aporte se puede ajustar la altura para seguir a esa intensidad.
- En este control, según la velocidad de alimentación de hilo y el Job establecidos se ha calculado la intensidad requerida por el proceso y se ha ajustado la altura del robot en tiempo real para seguir a este valor de

intensidad. Para ello, en el control se han introducido las ecuaciones que relacionan la velocidad de alimentación de hilo con la intensidad para diversos Jobs.

- La ganancia establecida en el control, es decir, la Kp, se debe de adecuar a la reactividad de la máquina en la que se instale el control. En este caso, para un robot industrial antropomórfico la ganancia calculada es de Kp=-0,3

CAPÍTULO IV

CAPÍTULO IV: TECNOLOGÍA WAAM BASADO EN GMAW: ACERO ER70S-6

1 Introducción

El objetivo de este capítulo ha sido desarrollar la tecnología WAAM basado en GMAW para el acero dulce ER70S-6. Para ello, se ha llevado a cabo un plan experimental que ha consistido, en primer lugar, en la fabricación de cordones simples para estudiar la influencia de los principales parámetros del proceso WAAM basado en GMAW y los diferentes modos de trabajo adecuados para aceros (GMAW pulsado, Cold Arc y Force Arc). En segundo lugar, los resultados obtenidos en los cordones simples han servido para fabricar una pared, y caracterizarla metalúrgica y geométricamente. Por último, se ha realizado una comparación entre la estrategia de oscilación frente a la estrategia de solape. Además, los resultados experimentales obtenidos se han utilizado para fabricar dos demostradores en este material utilizando la tecnología WAAM y el sistema robótico desarrollado en el capítulo anterior. Estos demostradores también valen para la validación de los resultados obtenidos.

2 Materiales y equipamiento

2.1 Materiales

Como material de aporte se ha utilizado un hilo comercial con diámetro de 1,2 mm de acero dulce ER70S-6 (EN ISO 14341-A - G 42 3 M21 3Si1) mediante la tecnología WAAM basado en GMAW. La composición elemental del hilo facilitado por el proveedor se puede ver en la Tabla IV-1. Como sustrato se han usado placas planas de acero S235JR (DIN ST37-2) de diferentes espesores. Siguiendo las recomendaciones del proveedor de la materia prima como gas de protección en toda la experimentación se utiliza una mezcla de 20% CO_2 - 80% Ar con un caudal de 17 l/min.

Tabla IV-1. Composición química del hilo de acero ER70S-6 en peso (%)

Mn	Si	C	Cr	Cu	Ni	S	P	Mo	Ti	Zr	Fe
1,64	0,94	0,06	0,02	0,02	0,02	0,016	0,013	0,005	0,004	0,002	bal.

Este tipo de aceros dulces, gracias al bajo contenido de carbono que tienen, son adecuadas para la soldadura, y, además, su coste es reducido. Gracias a sus características mecánicas y su soldabilidad, este tipo de materiales se utilizan ampliamente en sectores como el gas & oil, construcción y transporte.

Las propiedades mecánicas de este tipo de aceros varían en función de su composición química. En concreto, cuanto mayor sea el porcentaje de manganeso (Mn), aumenta la resistencia mecánica. Por otro lado, un aumento en el contenido de silicio (Si) desplaza hacia la izquierda la curva de enfriamiento de los aceros, haciendo más difícil la formación de martensita. Además, el silicio también hace el trabajo de antioxidante, es decir, que durante el proceso de soldadura el silicio reacciona con el oxígeno y éste último no se introduce en el acero. Esto produce una capa de óxido de silicio en la superficie del material aportado, llamado cascarilla, que, al no ser conductor crea problemas de encendido del arco de soldadura.

2.2 Equipamiento

El Set-up que se utilizará en toda la experimentación llevada a cabo en este capítulo es el que se ha desarrollado y detallado en el capítulo III.

2.3 Análisis de los parámetros y modos de trabajo principales del proceso WAAM basado en GMAW: Cordones simples

Conocer los principales parámetros del proceso WAAM basado en GMAW y su influencia sobre el aporte y la geometría del material aportado es muy importante ya que esto permite conseguir cordones adecuados y metalúrgicamente correctos. Por ello, el objetivo de este apartado ha sido determinar la influencia de los principales parámetros y modos de trabajo en cordones simples. Los principales parámetros de aporte son la velocidad de alimentación de hilo, la velocidad de avance y el Stick-out. En cambio, los modos de trabajo principales para los aceros son el GMAW pulsado, el Cold Arc y el Force Arc. Para ello, se han fabricado baterías de cordones simples. Toda la experimentación llevada a cabo en cordones simples en acero ER70S-6 ha sido en sustratos de grosor 10 mm.

2.3.1 Análisis de la influencia de la velocidad de alimentación de hilo (WFR) y el Stick-out en las señales de intensidad y tensión

Para analizar la influencia de la velocidad de alimentación de hilo y el Stick-out se han fabricado seis cordones con cada uno de los tres modos de trabajo principales: GMAW pulsado, Cold Arc y Force Arc. En concreto, se han elegido 3 niveles de velocidad de alimentación de hilo y 2 niveles de Stick-out. Como los límites de la velocidad de alimentación de hilo para cada modo de trabajo son diferentes; se han elegido tres niveles dentro de esos límites para cada uno. La velocidad de avance en todas ha sido de 650 mm/min (Tabla IV-2). Los

cordones han sido de 60 mm de largo. En estos cordones se ha estudiado la evolución de la intensidad y la tensión respecto a los parámetros analizados.

Tabla IV-2. Parámetros de los cordones fabricados para ver la influencia de la velocidad de alimentación de hilo

Número de cordón	Modo de trabajo	Job	WFR (m/min)	Stick-out (mm)
1.1	GMAW pulsado	9	4	15
1.2				22
1.3	GMAW pulsado	9	8	15
1.4				22
1.5	GMAW pulsado	9	16	15
1.6				22
1.7	Force Arc	180	4	15
1.8				22
1.9	Force Arc	180	8	15
1.10				22
1.11	Force Arc	180	18	15
1.12				22
1.13	Cold Arc	194	1	15
1.14				22
1.15	Cold Arc	194	3	15
1.16				22
1.17	Cold Arc	194	5	15
1.18				22

2.3.2 Análisis de la influencia de la velocidad de avance (TS) en la geometría de los cordones obtenidos

Por otro lado, para determinar la influencia de la velocidad de avance se han fabricado cordones con el modo GMAW pulsado. Se ha elegido solo este modo de trabajo porque los resultados obtenidos son extrapolables a otros modos de trabajo. En concreto, se han fabricado cordones únicos de 50 mm utilizando tres niveles de velocidad de alimentación de hilo (4, 8, 16 m/min). El Stick-out ha sido de 15 mm y cada cordón se ha fabricado con tres valores de velocidad de avance diferentes (300, 650, 800 mm/min) para poder observar el efecto

creado. Estos cordones se han medido con el escáner láser instalado en la antorcha de soldadura en el sistema robótico desarrollado.

2.3.3 Análisis de la influencia de los modos de trabajo principales sobre la penetración, dilución, microestructura y durezas

Para determinar la influencia de cada modo de trabajo en la penetración, dilución y microestructura de los cordones, se han fabricado cordones simples con los tres modos de trabajo principales (Tabla IV-3). Para ello, se han fabricado los cordones con dos niveles de velocidad de alimentación de hilo entre los límites de cada modo y para los modos GMAW pulsado y Force Arc la velocidad de avance ha sido de 650 mm/min y para Cold Arc en cambio de 300 mm/min. El Stick-out en todos los casos ha sido de 15 mm.

Tabla IV-3. Parámetros de fabricación de los cordones para ver la microestructura, la dilución y la penetración con cada modo de trabajo

Número de cordón	Modo de trabajo	Job	WFR (m/min)	TS (mm/min)	Stick-out (mm)
3.1	GMAW pulsado	9	8	650	15
3.2	GMAW pulsado	9	16	650	15
3.3	Force Arc	180	8	650	15
3.4	Force Arc	180	16	650	15
3.5	Cold Arc	194	3	300	15
3.6	Cold Arc	194	5	300	15

2.4 Análisis de la fabricación de una pared simple mediante WAAM basado en GMAW

Se ha fabricado una pared de un solo cordón de 45 capas para analizar la macroestructura, la microestructura y las durezas obtenidas. Las primeras dos capas se han fabricado con velocidades de alimentación de hilo de 16 m/min, las siguientes dos con 12 m/min, las siguientes dos con 10 m/min y el resto con 8 m/min. Esto se debe a que al inicio del proceso el sustrato esta frio y como resultado se crea un cordón más fino. Así, es necesario aportar más material para obtener una pared geométricamente homogénea. Como sustrato se han usado placas planas de 10 mm. El Stick-out ha sido de 15 mm, la velocidad de 650 mm/min y entre capas se han esperado 60 s.

2.5 Comparación de las estrategias de oscilación y solape en WAAM basado en GMAW

2.5.1 Estudio preliminar de selección de parámetros

Se ha realizado un estudio preliminar para la selección de parámetros del modo GMAW pulsado diseñando una batería de ensayos compuesto por cordones unitarios con el fin de encontrar los parámetros de proceso óptimos para la fabricación de las paredes con estrategias de oscilación y solape. En esta batería de ensayo, los cordones unitarios se han fabricado y se han escaneado con el escáner láser. Para diseñar el experimento preliminar, dentro del rango de posibles velocidades de alimentación de hilo se han elegido 5 niveles y se ha decido hacer una factorial completa tomando tres niveles de velocidad de avance, como se puede observar en la Tabla IV-4. Toda la experimentación llevada a cabo sobre las estrategias de solape y oscilación ha sido en sustratos de grosor 8 mm.

Tabla IV-4. Batería de selección de parámetros para la fabricación de paredes con estrategias de oscilación y solape en el modo GMAW pulsado en ER70

Parámetros	**Unidades**	**Valor codificado**				
		-2	-1	0	+1	+2
WFR	[m/min]	4	6	8	10	12
TS	[mm/min]		300	650	1000	

Tras la fabricación de los cordones, estos se han analizado teniendo en cuenta la homogeneidad, continuidad y forma geométrica. En cuanto a la forma geométrica, para medir el ancho y alto de los cordones se han utilizado los resultados del escáner láser obteniendo imágenes, como las de la Figura IV-1.

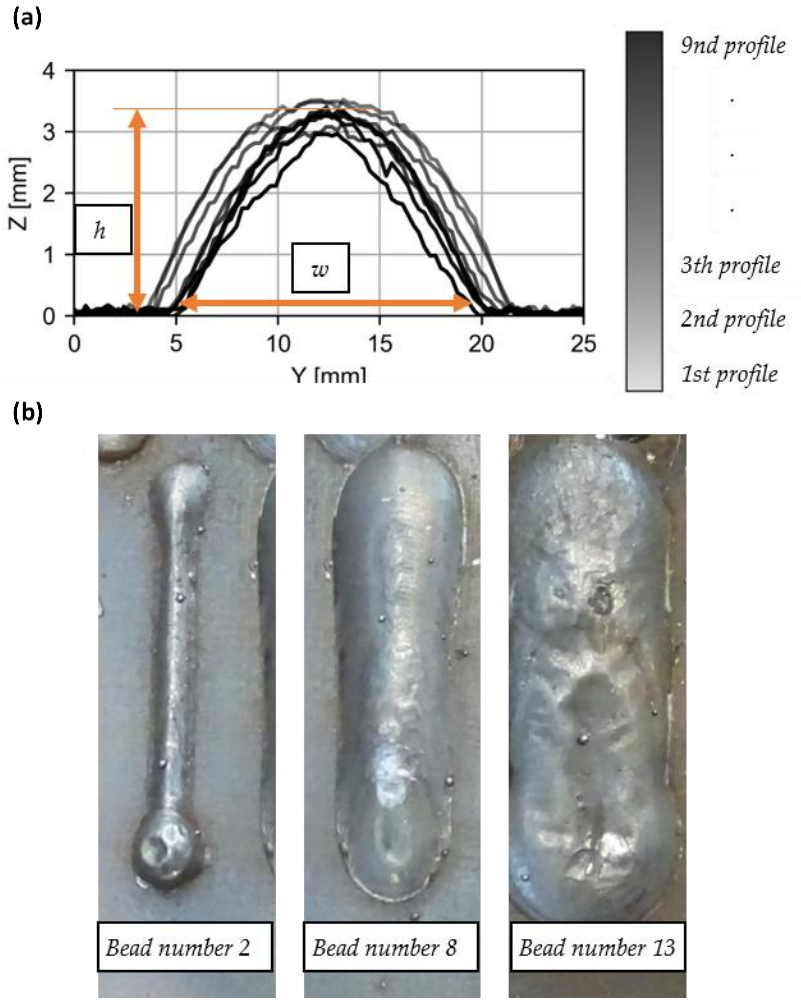


Figura IV-1. (a) Perfiles adquiridos mediante el escáner láser del cordón 7 donde se pueden apreciar la altura (h) y la anchura (w) del cordón; (b) Imágenes de los cordones 2, 8 y 13

Se han adquirido nueve perfiles generados por el láser en cada escaneo para obtener una nube de puntos que reproduce la geometría transversal de cada cordón (Figura IV-1 a). La anchura y la altura de los cordones se han calculado a partir de cada uno de estos perfiles y la media de estos valores (w_{avg} y h_{avg}) se puede encontrar en la Tabla IV-5. Además, en la Tabla IV-5 también se puede observar el producto de las inversas de las desviaciones estándar de la altura y de la anchura de los cordones. Este valor inverso es una característica geométrica (CG). El CG indica el nivel de homogeneidad y continuidad de los cordones y se logra siguiendo la Ec. 3.

$$CG = \frac{(\frac{1}{\sigma_w} * \frac{1}{\sigma_h})}{2}$$

donde,

$$\sigma_w = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(w_1 - \overline{w})^2}}{n}$$

$$\sigma_h = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(h_i - \overline{h})^2}}{n} \quad (3)$$

Además, el valor del ángulo de mojado que se puede ver en la Tabla IV-5 se calcula siguiendo la Ec. 4:

$$\text{Ángulo de mojado} = \tan^{-1}(\frac{h_{avg}}{w_{avg}/2}) \quad (4)$$

Tabla IV-5. Resultados medidos y calculados para la definición de la geometría de los cordones

Número de cordón	WFR	TS	w_m (mm)	h_m (mm)	CG	Ángulo de mojado (º)
1	-2	-1	7,30	2,69	12,27	36,37
2	-2	0	4,62	1,69	49,45	36,19
3	-2	+1	No continuo			
4	-1	-1	11,28	2,91	8,23	27,29
5	-1	0	7,96	2,41	18,14	31,15
6	-1	+1	4,43	2,18	34,32	44,59
7	0	-1	15,26	2,98	8,22	21,34
8	0	0	7,88	2,25	63,50	29,73
9	0	+1	5,52	1,95	15,65	35,21
10	+1	-1	15,05	3,39	29,40	24,25
11	+1	0	8,73	2,93	11,21	33,89
12	+1	+1	7,69	2,63	25,51	34,39
13	+2	-1	17,21	4,19	6,86	25,94
14	+2	0	10,88	3,24	27,58	30,78
15	+2	+1	8,38	2,60	10,33	31,86

Una vez que se han medido todos los cordones mediante el láser, se han determinado los parámetros de aporte óptimos teniendo en cuenta el valor CG máximo y un ángulo de mojado deseable [Dinovitzer, 2019]. En la literatura anterior, se ha documentado que un ángulo de mojado adecuado para los procesos de fabricación aditiva es de 30º. Por lo tanto, se ha decidido que los

parámetros utilizados en el cordón 8 son los óptimos para la fabricación de las paredes con estrategias de solapado y oscilación.

2.5.2 Parámetros de fabricación de las paredes

Se han fabricado tanto la pared simple oscilada como la solapada con el modo de trabajo GMAW pulsado. Las paredes tienen l:220 mm de largo y tienen la misma anchura y altura de w: 20 mm y z: 70 mm fabricadas con dos estrategias de aporte diferentes: Pared 1 solapado y Pared 2 oscilado. La Figura IV-2 representa las trayectorias programadas para las dos estrategias estudiadas. En los dos casos, capas alternantes se han aportado en direcciones opuestas para mantener la exactitud geométrica y prevenir el efecto que ha sido reportado por Zhang et al. [Zhang, 2002] en paredes rectangulares. Es decir, el aporte se ha hecho con movimientos de la antorcha bidireccionales. En la Pared 1, tres cordones han sido solapados en cada capa, ya que con un único cordón es imposible obtener anchuras de pared de 20 mm. En este caso, el ratio de solapamiento ha sido del 65% de la anchura de un único cordón (6,9 mm). Por otro lado, en la Pared 2, para obtener la misma anchura que la Pared 1, se ha llevado a cabo una estrategia de movimiento triangular oscilante con una amplitud de 10 mm (desde el centro al pico), aplicando una compensación de la herramienta igual a la mitad del ancho del paso de soldadura esperado y una frecuencia de 1,5 Hz.

En ambas paredes, entre los cordones aportados se ha tenido un tiempo de espera hasta que el pirómetro ha leído una temperatura inferior a 400 ºC, para evitar un calentamiento excesivo de la pieza. Por lo tanto, en la estrategia de oscilación, se ha esperado un único tiempo de enfriamiento en cada capa, en la pared solapada, en cambio, se han tenido tres tiempos de enfriamiento por capa. Por otro lado, gracias al escáner láser, cada dos capas se han escaneado las paredes fabricadas, representado la geometría de las paredes para determinar manualmente la posición Z para la trayectoria de la siguiente capa en ambas estrategias.

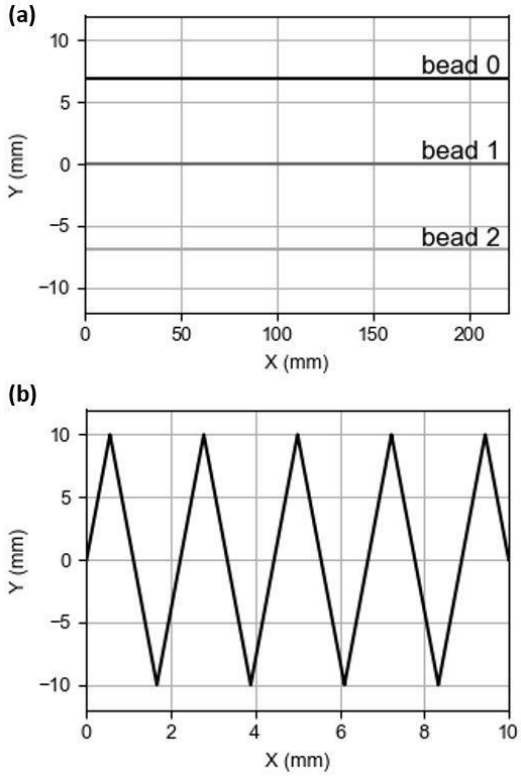


Figura IV-2. (a) Trayectoria de la estrategia solapada; (b) Trayectoria de la estrategia oscilada

La longitud del Stick-out en los dos casos ha sido de 15 mm. Ya que en este estudio se ha querido obtener un proceso estable con una penetración adecuada, en la Tabla IV-6 aparecen los principales parámetros de fabricación de las dos paredes. Estos parámetros han sido elegidos por el estudio preliminar de selección de parámetros llevado a cabo. En cuanto a las velocidades de avance elegidas, estas son comparables, como se puede apreciar en el análisis cinético posterior que se lleva a cabo. En este análisis, si se compara la longitud de la trayectoria para cubrir los 200 mm en la dirección X de la pared objetivo en la estrategia solapada, la antorcha recorre 627,6 mm (3 x 200 mm de cada pasada y movimientos inactivos) y 200 mm en el caso de la oscilación. Si tenemos en cuenta las velocidades de avance comandadas (650 mm/min para la pared solapada y 200 mm/min para la oscilada) el tiempo de adición es comparable en ambos casos (1 min).

Tabla IV-6. Parámetros de fabricación de la pared solapada y oscilada

Pared	WFR (m/min)	I (A)	V (V)	Anchura de un único cordón (mm)	TS (mm/min)	DR (kg/h)	T espera (ºC)
Solapada	8	229	27,1	8	650	4,26	400
Oscilada	8	244	26,6	8	200	4,26	400

Además, la Figura IV-3 muestra la intensidad y la tensión media por número de capa en las dos paredes. Se observa que son comparables en ambas estrategias, por lo que su producto que define la energía suministrada es igual en ambos casos.

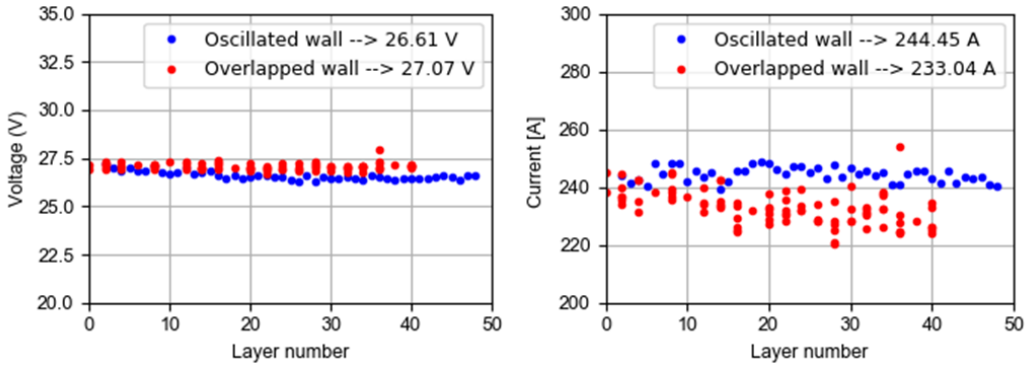


Figura IV-3. Intensidad y tensión media durante la fabricación de cada capa en las dos estrategias de fabricación

2.6 Método para la caracterización metalúrgica y mecánica

Tanto para el análisis metalográfico de los cordones como de las paredes, las muestras se han seccionado con una sierra metálica, se han pulido mecánicamente y se han revelado con una solución de Nital (ácido nítrico y etanol) al 2% sucesivamente. Una vez preparadas las muestras, las microestructuras y las macroestructuras se han observado con el microscopio Nikon Eclipse MA200 (Nikon Metrology Inc, Bélgica). Las mediciones de dureza Vickers se han realizado a temperatura ambiente, utilizando la máquina Duramin A-300 (Struers, Dinamarca), de acuerdo con la norma ISO 6507-1 [UNE- EN ISO 6507-1].

Para ver la macroestructura, microestructura y medir las durezas de los cordones estos se han cortado trasversalmente en la parte media. En concreto, se ha mirado la microestructura y se ha medido la dureza en los puntos que se pueden apreciar en la Figura IV-4.

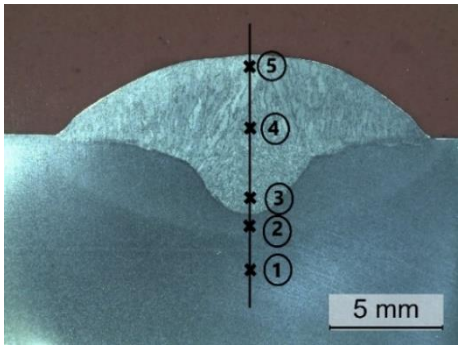


Figura IV-4. Macrografía de un cordón con los puntos de medición de durezas y observación de la microestructura señalados

En cuanto a las microestructuras y mediciones de las durezas de la pared simple, está también se ha cortado trasversalmente y se han medido las durezas y se ha observado la microestructura señalada en la Figura IV-5.

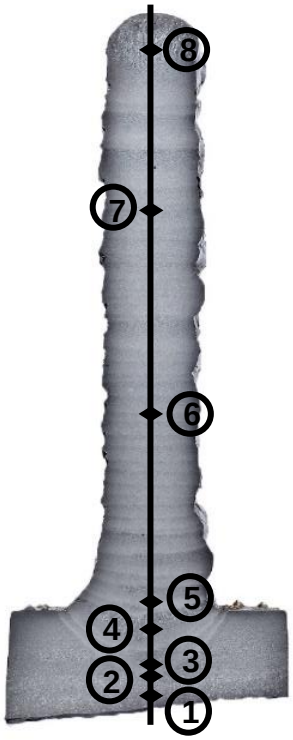


Figura IV-5. Macrografía de la pared con los puntos de medición de durezas y observación de la microestructura señalados

Por último, en cuanto a las paredes oscilada y solapada, las micrografías y las durezas Vickers se han medido en la cara transversal, en la parte central de las paredes a tres alturas: superior, media e inferior. Además, se han realizado ensayos mecánicos con probetas extraídas de estas paredes: ensayo de tracción y ensayo de Charpy. Como se ve en la Figura IV-6, en ambas paredes se han extraído seis probetas de tracción en dirección vertical, seis probetas de tracción en dirección horizontal y cuatro probetas verticales para ensayo de impacto Charpy. La disposición de las probetas busca analizar la influencia de la direccionalidad del material en su comportamiento mecánico.

Las dimensiones de las probetas de tracción siguen la norma ISO 6892-1 [UNE- EN ISO 6507-1], con un diámetro estrecho de 4 mm y una longitud de 22 mm, con roscas en los extremos de M-6. La máquina donde se realizan los ensayos de tracción uniaxial a temperatura ambiente ha sido la Instron 5585H (Instron, Estados Unidos) con una carga máxima de 100 kN y equipada con un extensómetro de contacto (Instron EX2620-602, Instron, Estados Unidos). Las pruebas de Charpy se han realizado a temperatura ambiente en una máquina

Ibertest PIB300 de péndulo de prueba de impacto (Ibertest, España). Siguiendo la norma ISO 148-1 [UNE-EN ISO 148-1], se han utilizado probetas de ensayo de impacto Charpy con una longitud de 55 mm y un espesor de 10 mm.

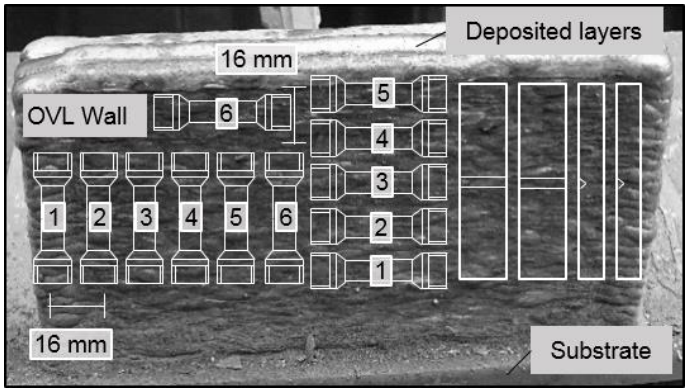


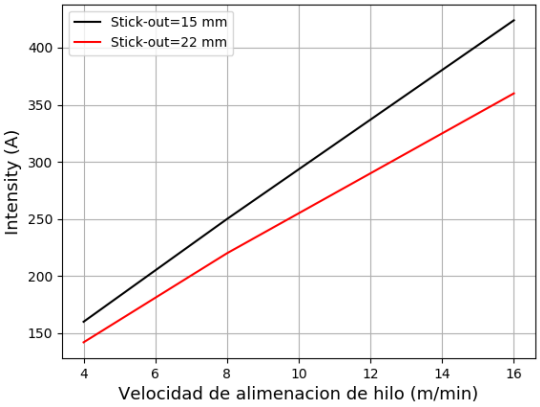
Figura IV-6. Distribución de probetas para el análisis de las propiedades mecánicas en la pared oscilada y solapada

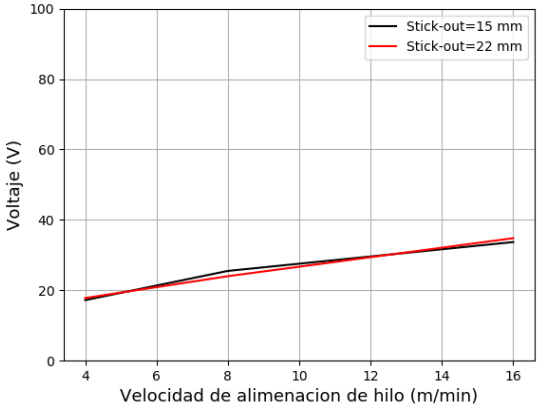
3 Resultados y discusión

3.1 Análisis de los parámetros y modos de trabajo principales del proceso WAAM basado en GMAW: Cordones simples

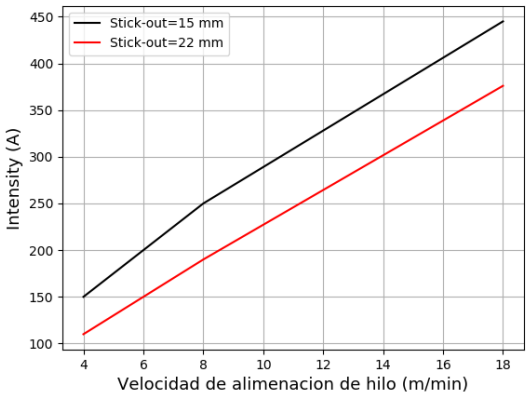
3.1.1 Análisis de la influencia de la velocidad de alimentación de hilo (WFR) y el Stick-out en las señales de intensidad y tensión

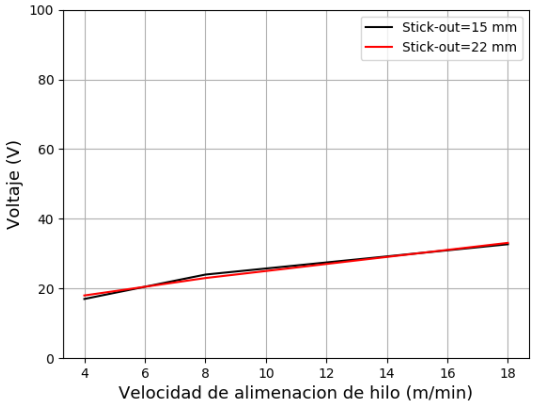
En la Figura IV-7 se aprecia la evolución de la intensidad media y de la tensión media según la velocidad de alimentación de hilo en la fabricación de estos cordones. Tal y como se ha planteado en el capítulo III, gracias a la fuente de soldadura utilizada es sinérgica, la máquina automáticamente crea la forma de la señal de intensidad a aplicar al hilo en función de la velocidad de alimentación y el modo de soldadura elegidos. De esta manera, el valor de la intensidad media aumenta linealmente con la cantidad de material introducido (WFR), mientras que la tensión aumenta ligeramente, pero se encuentra cerca de un valor constante. En cuanto al Stick-out, se ha observado que aun siendo sinérgico la fuente de soldadura, éste afecta al valor de la intensidad media; cuanto mayor es el Stick-out menor es la intensidad. La tensión en cambio permanece constante a la variación del Stick-out. Esto corrobora el funcionamiento del sistema sinérgico experimentalmente y también valida los resultados obtenidos en el capítulo III en cuanto a la influencia del Stick-out analizado detalladamente para el desarrollo del control de altura.



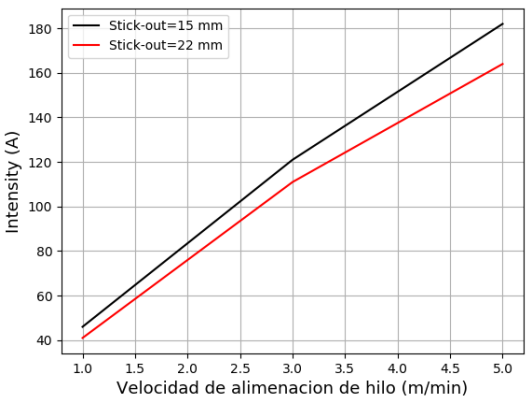


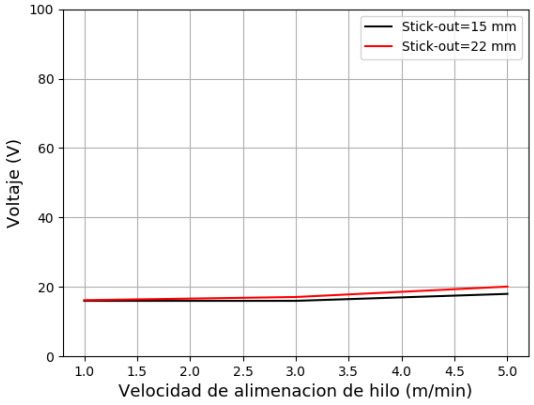
(a)





(b)





(c)

Figura IV-7. Representación de la influencia de la velocidad de alimentación de hilo en los valores medios de intensidad y tensión, (a) en el modo GMAW pulsado, (b) Force Arc y (c) Cold Arc

En cuanto a los diferentes modos de trabajo, se observa que el modo Cold Arc en comparación con los otros dos modos de trabajo tiene valores de velocidad de alimentación de hilo permitidos menores y, por lo tanto, los valores de intensidad obtenidos también son más reducidos.

3.1.2 Análisis de la influencia de la velocidad de avance (TS) en la geometría de los cordones obtenidos

Para determinar la influencia de la velocidad de avance, en la Tabla IV-7 se pueden observar los parámetros de los cordones fabricados con el modo GMAW pulsado. Es de vital importancia la energía instantánea suministrada por unidad de longitud, el cual, relaciona la intensidad, la tensión y la velocidad de avance (TS) según la Ec. 5.

$$Energy\ \left[\frac{J}{mm}\right] = \frac{I*V}{TS} \quad (5)$$

Por un lado, como se puede observar en la Tabla IV-7, al aumentar la velocidad de alimentación de hilo, para la misma velocidad de avance, la energía suministrada por unidad de longitud es mayor. Esto ocurre debido a que al aumentar la velocidad de alimentación de hilo la intensidad crece linealmente como se ha visto en la Figura IV-7.

Tabla IV-7. Parámetros utilizados para fabricar cordones únicos para determinar la influencia de la velocidad de avance y los valores de anchura y altura del cordón obtenidos mediante las mediciones del láser

Número cordón	WFS (m/min)	Stick-out (mm)	TS (mm/min)	Energía (J/mm)	Anchura (mm)	Altura (mm)
2.1	4	15	300	563,37	7,30	2,69
2.2	4	15	650	300,83	4,62	1,69
2.3	4	15	800	238,69	4,37	1,55
2.4	8	15	300	1415,95	15,26	2,89
2.5	8	15	650	557,27	7,43	2,25
2.6	8	15	800	512,87	6,52	1,95
2.7	16	15	300	3070,15	21,76	5,16
2.8	16	15	650	1389,73	12,83	4,86
2.9	16	15	800	1084,57	11,13	4,37

Por otro lado, con los mismos valores de velocidad de alimentación de hilo, al cambiar la velocidad de avance, esta no tiene ningún efecto sobre la intensidad, pero si en la forma del cordón obtenido (anchura y altura). Esto, ocurre a causa de que la cantidad de material aportado por unidad de longitud no es igual y la energía suministrada tampoco (Tabla IV-7). Como se observa en la Figura IV-8, analizando los datos adquiridos con el escáner láser, todos los cordones se han fabricado con velocidades de alimentación de hilo de 16 m/min pero a mayores avances los cordones obtenidos son más estrechos,

debido a que se aporta menos material en cada unidad de longitud. En la Figura IV-8 a, la velocidad de avance es de 300 mm/min y el cordón es el más ancho, en cambio, en la Figura IV-8 b, el avance es de 650 mm/min y el cordón se estrecha. Por último, en la Figura IV-8 d, se tiene el cordón fabricado a 800 mm/min y es el de menor anchura. Resumiendo, la velocidad de avance no afecta a la intensidad y a la tensión introducidas en el proceso, pero si a la energía instantánea suministrada por unidad de longitud y a la forma del cordón obtenido.

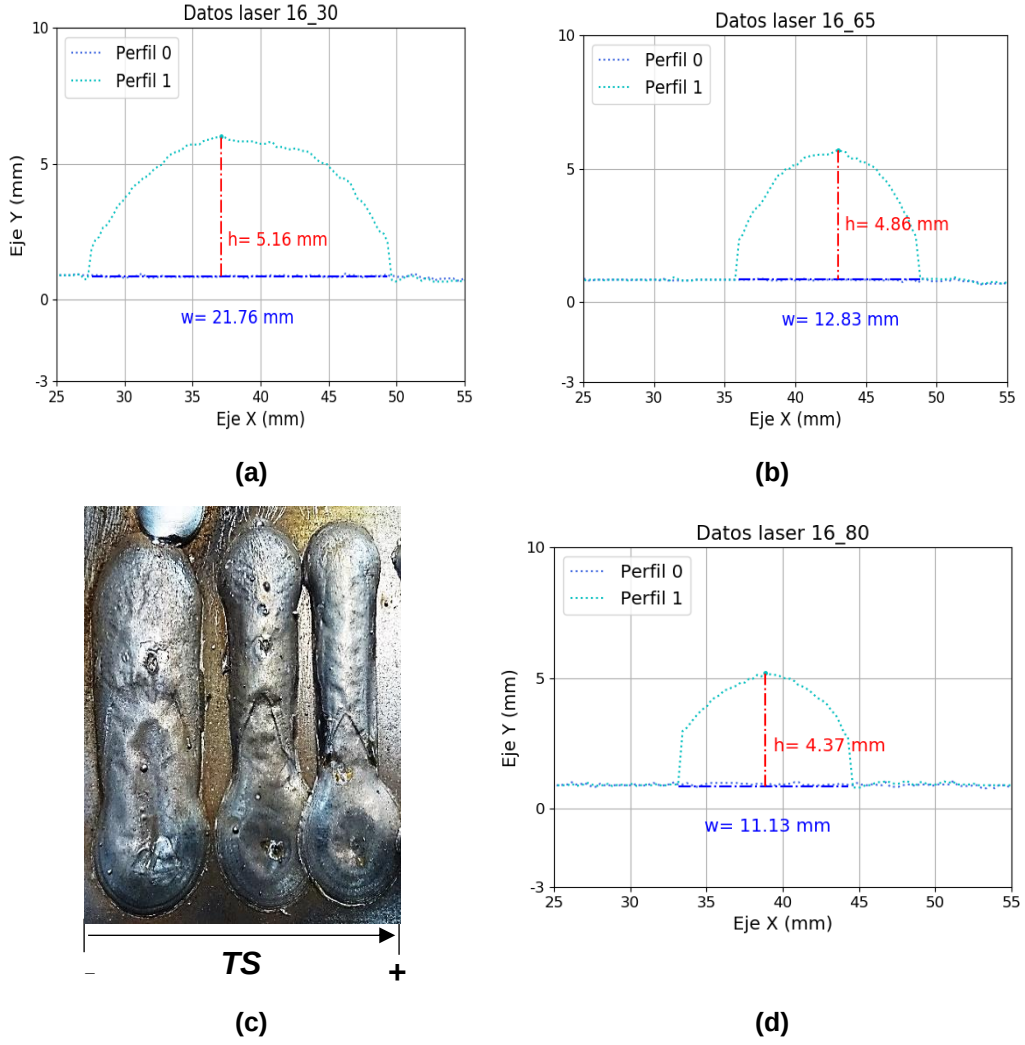


Figura IV-8. (a) Representación gráfica de la nube de puntos del cordón 2.7; (b) representación gráfica de la nube de puntos del cordón 2.8; (c) cordones de soldadura fabricados con velocidades de alimentación de hilo de 16 m/min (n. cordón = 2.7, 2.8, 2.9) y (d) representación gráfica de la nube de puntos del cordón 2.9

3.1.3 Análisis de la influencia de los modos de trabajo principales sobre la penetración, dilución, microestructura y durezas

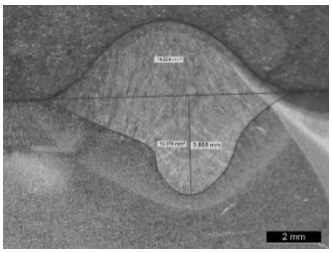
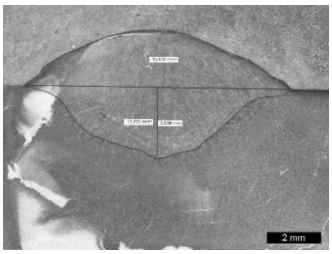
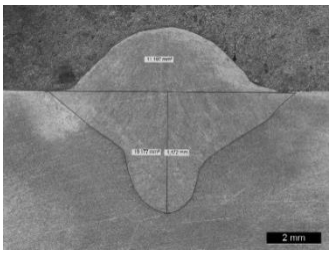
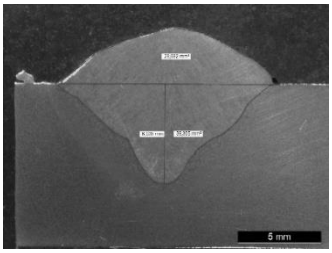
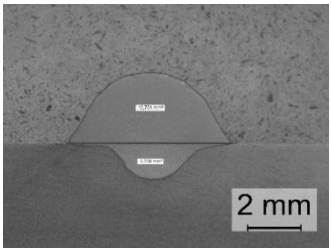
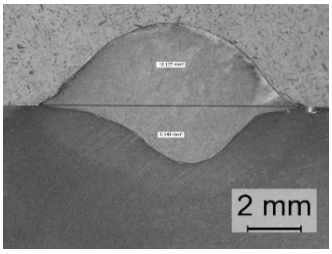
a) Dilución y penetración

Se han fabricado cordones con los tres modos de trabajo principales con dos valores de velocidad de alimentación de hilo entre los límites de cada modo. En la Tabla IV-8 se ven las macrografías transversales de los cordones donde se puede observar la forma de la dilución, el porcentaje de la dilución y la penetración.

La dilución se calcula como el porcentaje del área del material aportado que está por debajo del sustrato, es decir, el área del material que ha penetrado en el sustrato, de todo el área del material aportado (Ec. 6).

$$Dilución = \frac{A_{depositado} - A_{penetrado}}{A_{depositado}} * 100 \quad (6)$$

Tabla IV-8. Macrografías transversales de los cordones, la dilución y la penetración en los cordones aportados para ver la influencia del modo de trabajo

N. cordón	Modo de trabajo	Forma de la dilución	Dilución (%)	Penetración (mm)
3.1	**GMAW pulsado**		51,46	3,68
3.2			50,30	5,27
3.3	**Force Arc**		63,14	4,47
3.4			57,17	6,02
3.5	**Cold Arc**		23,12	1,3
3.6			32,03	2,13

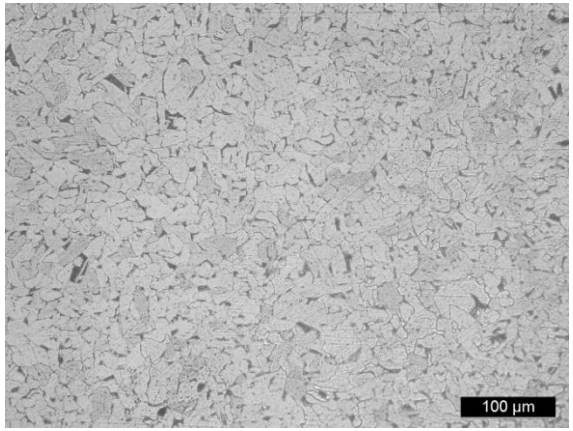
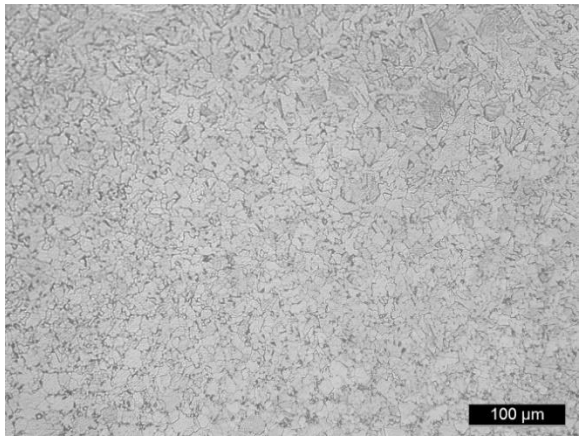
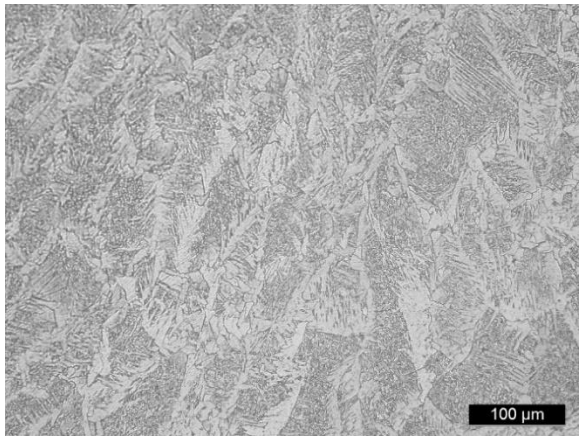
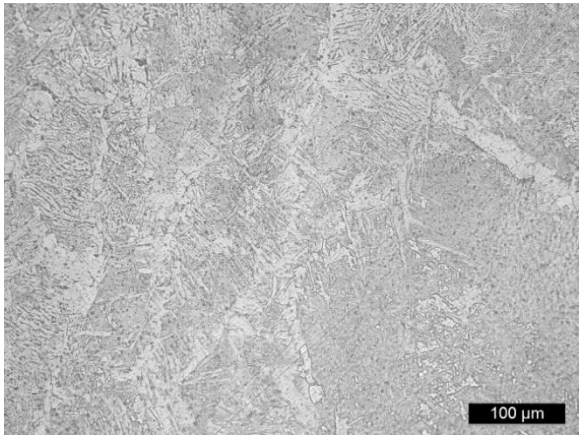
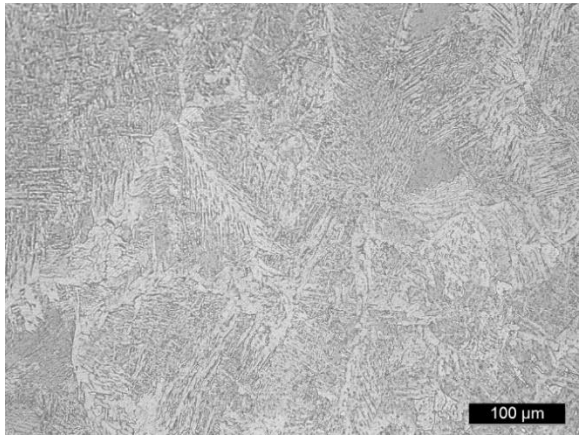
De los datos anteriores se puede concluir que el modo Force Arc consigue las huellas con mayor penetración gracias al arco eléctrico de alta presión en comparación con el modo GMAW pulsado. De esta manera, en el modo Force Arc se obtiene alta estabilidad direccional y la penetración suele ser profunda y concentrada. Por ello, también la dilución es mayor. Todo lo contrario, ocurre con el modo Cold Arc que con tasas de aporte bajas e inputs térmicos reducidos obtiene penetraciones poco profundas y diluciones pequeñas. Esto también se debe a que en los cordones Cold Arc la cantidad de material introducido (WFR) ha sido inferior ya que sus límites de velocidad de alimentación de hilo son menores. Aun así, se puede concluir que incluso para el rango en el que puede trabajar Cold Arc, se obtendrían valores de penetración y dilución inferiores en este modo que en los otros dos.

En conclusión, como se ha nombrado en el capítulo anterior, para el proceso WAAM basado en GMAW no se recomienda el uso del modo Force Arc más allá de la primera capa ya que con el arco eléctrico de alta presión se obtienen penetraciones excesivas y puede acarrear el colapso de la pieza.

b) Microestructura y durezas

En cuanto a la microestructura de los cordones obtenidos, se han sacado micrografías en 5 puntos de los cordones, a alturas diferentes (definición de los cinco puntos en la Figura IV-4) y se han medido las durezas en los mismos puntos. En la Tabla IV-9 se pueden ver las micrografías del cordón 3.1, pero los resultados han sido similares para todos los cordones fabricados con diferentes modos de trabajo en esta experimentación.

Tabla IV-9. Micrografías del cordón 3.1 en cinco puntos definidos en la Figura IV-4 y las durezas correspondientes a estos puntos

		
(1) → 122 HV	**(2) → 140 HV**	**(3) → 192 HV**
		
(4) → 200 HV	**(5) → 198 HV**	

El primer punto está en el sustrato y como se observa se tiene una microestructura de granos poligonales equiaxiales, que no ha sido alterado por el proceso de aporte del cordón. El segundo punto está en la zona térmicamente afectada (*Heat Affected Zone, HAZ*) del sustrato y también presenta una microestructura de grano poligonal, pero de menor tamaño a causa del calor suministrado al aportar el cordón. En cambio, en los puntos 3, 4 y 5, en los que están dentro del cordón, se tiene una microestructura de ferrita acicular. Esta es una microestructura muy habitual en cordones de soldadura de aceros dulces creada debido a las altas velocidades de enfriamiento que crea el proceso de soldadura [Babu, 2004]. En cuanto a durezas, se ve que en los puntos del cordón que se tiene ferrita acicular el valor de la dureza es superior que en el sustrato que se tiene una estructura poligonal. Además, en el HAZ el valor de dureza es un poco superior al del primer punto porque, aunque en las dos zonas se tenga una microestructura poligonal el tamaño de grano es inferior en la zona térmicamente afectada.

3.2 Análisis de la fabricación de una pared simple mediante WAAM basado en GMAW

3.2.1 Análisis de la macroestructura

En la Figura IV-9 se puede observar una macrografía de la pared simple. En ella, se aprecia una microestructura común en el centro de la pared y diferencias en la parte superior e inferior. En la zona inferior de la pared se aprecia la penetración del primer cordón en el sustrato que forma una estructura de ferrita acicular y debajo se observa la HAZ formando un semicírculo (resultados iguales que en las microestructuras de un único cordón en la Tabla IV-9).

Sin embargo, a medida que crece la pared no se aprecia la estructura de ferrita acicular dado que los cordones aportados sufren un ciclo térmico a causa del calor suministrado al aportar el siguiente cordón. Finalmente, en la parte superior de la pared, en el último cordón aportado, se vuelve a observar la microestructura de ferrita acicular nombrada previamente, debido a que esté no tiene cordones posteriores que pueden generar el suministro térmico necesario para trasformar la microestructura.

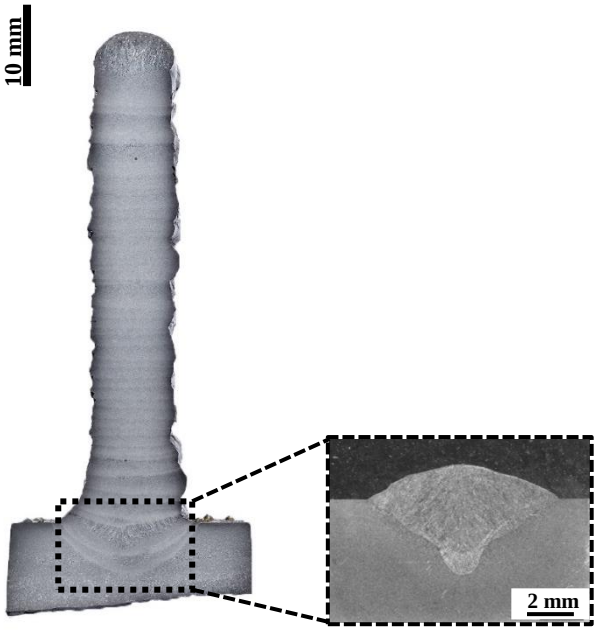


Figura IV-9. Macrografía de la pared simple y detalle del primer cordón aportado

Por otro lado, no se aprecian defectos macroscópicos internos comunes a la tecnología aplicada como pudieran ser inclusiones, poros o rechupes, lo que significa que la pared fabricada tiene una sanidad estructural aceptable.

3.2.2 Análisis de la microestructura

Para analizar en detalle la microestructura de la pared simple fabricada, se han sacado micrografías a 8 alturas diferentes (alturas determinadas en la Figura IV-5) como se pude observar en la Figura IV-10. El primer punto está en el sustrato y el segundo en la zona térmicamente afectada en los que se puede observar un grano poligonal. El tercer punto, ya se encuentra dentro del primer cordón aportado y también tiene estructura de ferrita poligonal. El cuarto punto tiene una microestructura de ferrita acicular que se crea en la interfase del segundo cordón y el tercero, a causa de que esta zona no se ve afectada térmicamente por el calor suministrado por el siguiente cordón. Ya a lo largo de la pared (en los puntos 5, 6 y 7) se obtiene un grano también poligonal, ya que en toda la pared las capas se ven afectadas térmicamente por el aporte de las posteriores. Por último, el punto 8 tiene estructura de ferrita acicular porque al ser la última capa no soporta el suministro térmico de ningún aporte posterior.

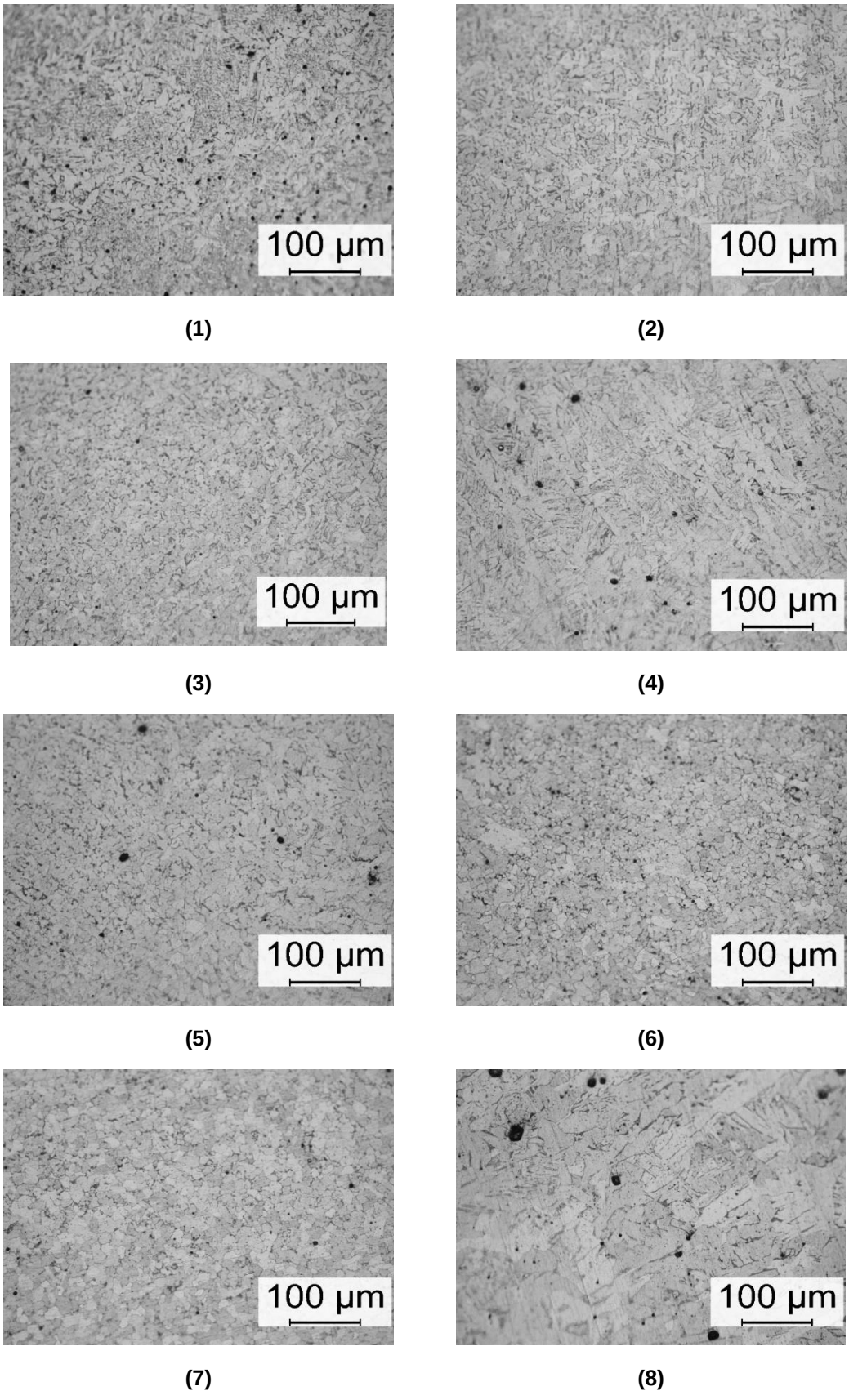


Figura IV-10. Microestructuras obtenidas en los puntos de la pared simple señalados en la Figura IV-5

3.2.3 Estudio de la geometría

Durante la fabricación de las paredes, después del aporte de cada cordón, esta ha sido escaneada mediante el escáner láser obteniendo una nube de puntos que contiene la información sobre la forma geométrica de la pared después de cada aporte.

Gracias a esta información, se han graficado estas nubes de puntos y se ha podido calcular la anchura y la altura de la pared después de cada aporte. Además, también se ha obtenido la anchura y la altura efectiva de la pared. La pared efectiva se llama a aquella pared que se tiene después de haber mecanizado la original fabricada mediante WAAM para poder utilizarla en la aplicación deseada. Conocer la forma geométrica de la pared efectiva es muy importante para poder predecir si la pared fabricada mediante WAAM cubre las necesidades geométricas de dicha aplicación. Es decir, se puede conocer las dimensiones de la pared a fabricar mediante WAAM para que después de mecanizar tengamos una pared que cubra las necesidades geométricas que se tengan. Como ejemplo, en la Figura IV-11 se puede observar la forma de los primeros 22 cordones pares (Figura IV-11 a) e impares (Figura IV-11 b) que se han aportado a la hora de la fabricación de la pared simple. Además, en las gráficas se han definido las alturas que ha adquirido la pared con cada cordón. Finalmente, en la Figura IV-11 b, también se ha representado la pared efectiva que tiene dimensiones de 10,21 x 32,17 mm. De esta manera, se ha demostrado que el escáner láser aparte de ayudar a monitorizar la geometría del material aportado y de dar la opción de definir al operario el crecimiento por capa después de ver lo aportado hasta el momento, también ayuda a definir la pared efectiva que se obtiene.

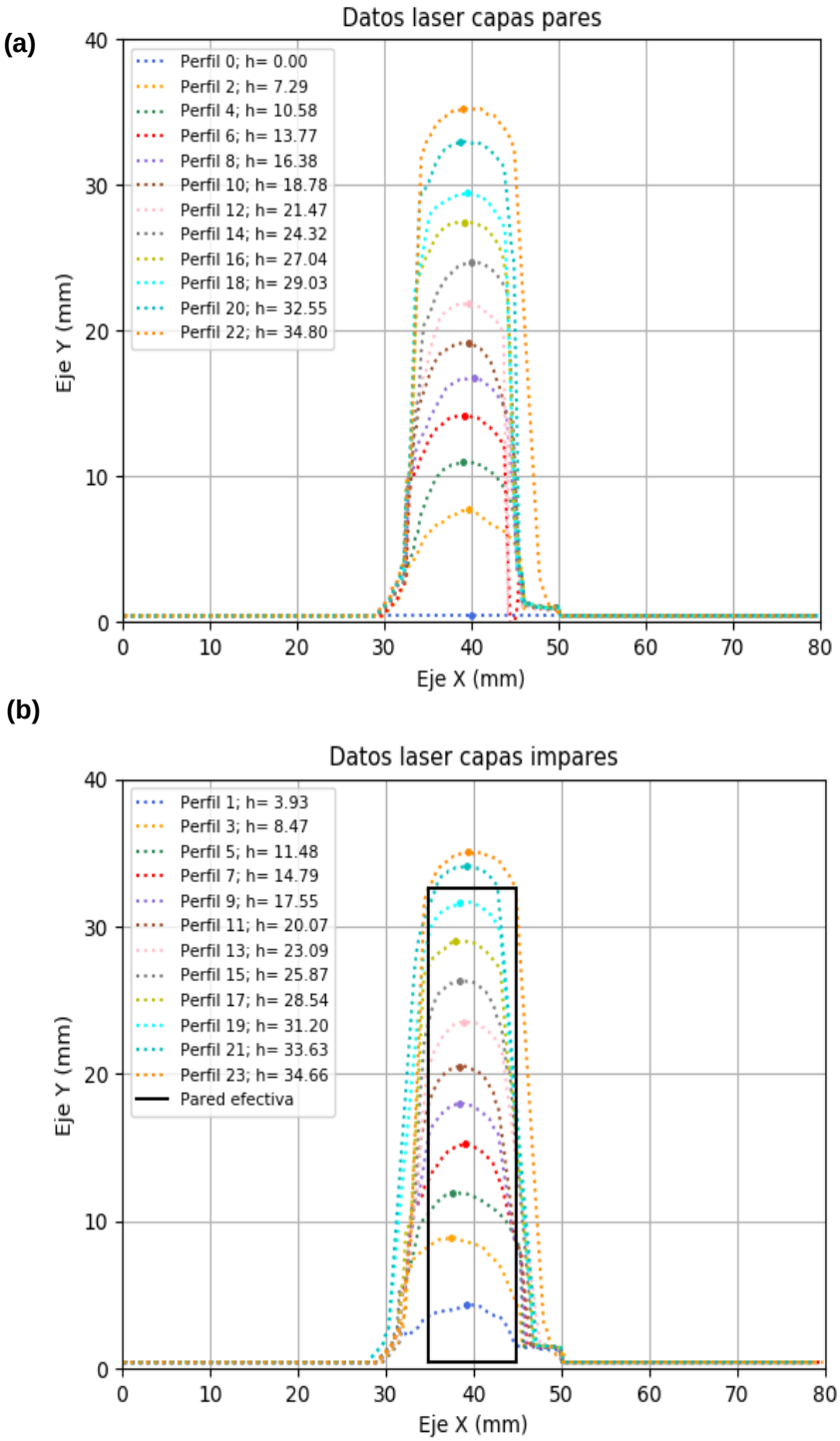


Figura IV-11. (a) Representación gráfica de la nube de puntos de los cordones pares; (b) Representación gráfica de la nube de puntos de los cordones impares y la representación de la pared efectiva obtenida (en negro)

3.3 Comparación de las estrategias de oscilación y solape en WAAM basado en GMAW

3.3.1 Aporte del material y el crecimiento por capa

Para estudiar el aporte del material y el crecimiento por capa en las estrategias de oscilación y solape se ha definido un volumen de control de tres dimensiones (Δx, Δy, Δz) en las dos paredes, como se puede observar en la Figura IV-12. En general, el volumen de control es el volumen de referencia necesario para obtener resultados comparables de algunos parámetros dependientes del volumen elegido, como el aporte del material y el suministro térmico. En este y en futuras líneas de investigación se recomienda utilizar el concepto del volumen de control para conseguir resultados comparables. En este caso, teniendo en cuenta que se quieren fabricar paredes geométricamente lo más cercanos posibles a la pared objetivo (anchura de pared 20 mm y altura 70 mm), el volumen de control en ambas paredes abarca todo el material aportado en un área de 20 mm de ancho (Δx) y 20 mm de largo (Δy). La altura del volumen de control (Δz) sería equivalente a la de dos capas consecutivas porque el láser escanea cada dos capas.

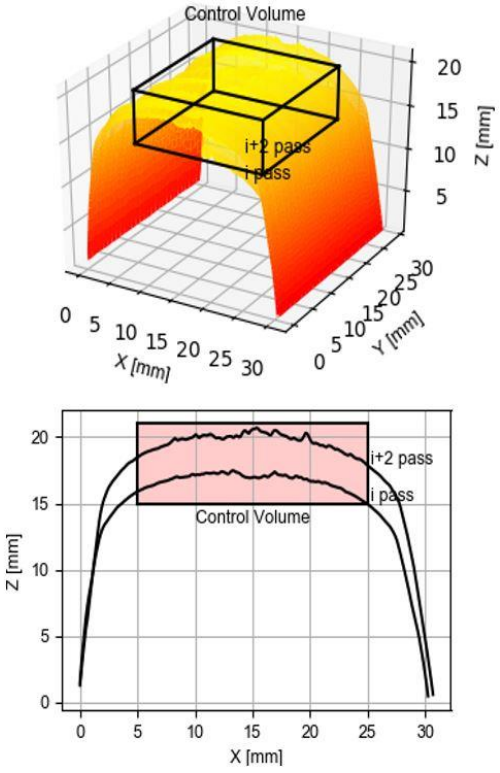


Figura IV-12. Definición del volumen de control

Con respecto al aporte del material dentro del volumen de control, el aporte de ambas estrategias se presenta en la Figura IV-13. Como se mencionó anteriormente, en cada pulso de intensidad unitaria, el proceso de aporte GMAW pulsado sinérgico desprende una serie de gotas de pequeño tamaño fundidas quasi-idénticas de pequeño tamaño, como se representa en la Figura III-6. Como la velocidad de alimentación de hilo es la misma en las dos paredes comparadas, la cantidad de material en cada gota también es quasi-igual.

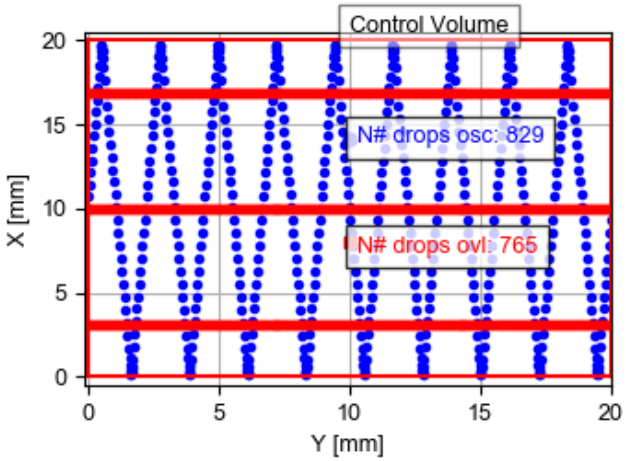


Figura IV-13. Trayectoria de la antorcha y el aporte de gotas durante la fabricación de las paredes oscilada y solapada dentro del volumen de control

Sin embargo, dentro del volumen de control, el número de gotas aportadas es mayor durante la fabricación de la pared oscilada que en la solapada: 829 y 765 gotas, respectivamente.

Para determinar el efecto del suministro de calor en las paredes fabricadas y calcular el aporte de material, es importante, en primer lugar, comprender la cinética del proceso. En el caso de la pared solapada, la velocidad de avance de la antorcha de soldadura es constante a lo largo de toda la trayectoria, lo que resulta en un aporte uniforme. Por otro lado, en la Figura IV-14 se muestra un ciclo de la trayectoria de la antorcha en la pared oscilada y su distribución de la velocidad de avance. En este caso, la velocidad es menor en los lados que en la parte central, volviéndose nula en las esquinas debido al cambio de dirección. Por lo tanto, el aporte de material no es uniforme a lo largo de todo el trayecto, aportando más gotas en las esquinas que en la parte central debido a su campo de velocidades.

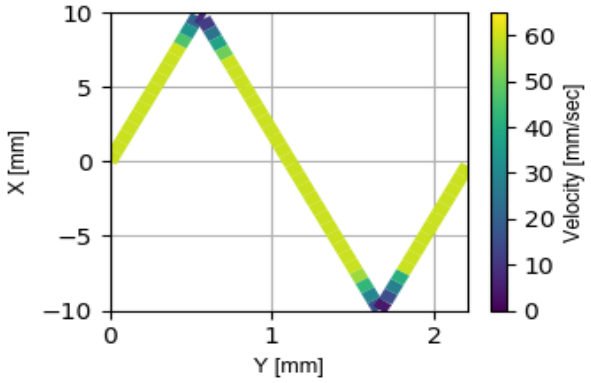


Figura IV-14. Trayectoria de la antorcha y el campo de velocidades durante la fabricación de la pared oscilada

Para obtener el número de gotas por milímetro avanzado, sería suficiente integrar el producto de la velocidad instantánea por el avance recorrido en la dirección x e y. En el caso del solape, se debe tener en cuenta que es necesario solapar tres cordones de soldadura para obtener la misma anchura de pared que la oscilada y que la velocidad instantánea es constante e igual a la velocidad de avance de la antorcha (Ec. 7). En el caso de la pared fabricada mediante oscilación, partiendo de la velocidad instantánea en función de la posición de la antorcha registrada en el control (V (x, y)), es multiplicado por el avance diferencial. En ambos casos, la frecuencia de aporte de las gotas viene dada por los valores programados en la fuente de soldadura para el modo de trabajo seleccionado (f = 138,2 gotas/s). En la Ec. 8, la integral se ha calculado mediante su resolución basada en la suma de las multiplicaciones de las velocidades instantáneas y las posiciones registradas mediante el sistema de monitorización.

$$Ngotas_{ovl} = V \cdot \Delta x \cdot \Delta y \tag{7}$$

$$Ngotas_{osc} = \int_{-10}^{10} \int_{0}^{1} V(x,y)\delta x \delta y \cdot f_{drop} \tag{8}$$

En la Tabla IV-10 se muestra la comparación de la cantidad de gotas aportadas por milímetro avanzado en ambas estrategias. En el caso del movimiento oscilatorio, se observa un mayor número de gotas por mm avanzado con una distribución más homogénea, según la trayectoria.

El volumen de material aportado ($V_{aportado}$) se puede calcular usando la Ec. 9, donde DR es la tasa de aporte, WFR es la velocidad de alimentación de hilo y A es el área transversal del hilo. Como se vio anteriormente, el número de gotas dentro del volumen de control es mayor en la pared oscilada; así, el volumen aportado también es mayor en esta pared, ya que todas las gotas

tienen el mismo volumen, gracias al proceso sinérgico GMAW pulsado. La Tabla IV-10 muestra los valores de $V_{aportado}$ en el volumen de control (dos capas) en ambas paredes:

$$V_{aportado} = \frac{DR*l}{TS*\rho}$$

donde,

$$DR = WFR * \rho * A \quad (9)$$

Además, otro parámetro importante en el proceso WAAM es el crecimiento volumétrico por capa (ΔV). Para calcular este crecimiento dentro del volumen de control, se utilizan las nubes de puntos que representan los perfiles transversales de las paredes $(p(x)_i)$. Estos datos se obtuvieron escaneando las paredes cada dos capas con el escáner láser durante el proceso de fabricación. Por ejemplo, la Figura IV-15 muestra el crecimiento volumétrico por capa, de las capas 25 y 26 en ambas paredes. Para determinar este crecimiento, primero, se calcula y representa la resta entre los dos perfiles transversales consecutivos, como se muestra en la Figura IV-15. Las curvas graficadas en esta figura, en concreto, representan la resta del perfil trasversal de la capa 26 y la capa 24 en las dos paredes. Después, para proseguir con el cálculo del crecimiento volumétrico por capa dentro del volumen de control, se calcula el área bajo la curva. Este proceso se puede definir con la Ec. 10, donde $p(x)_i$ son los perfiles transversales escaneados con el escáner láser, Δx es la longitud tomada en la dirección del eje X—en este caso, el ancho del volumen de control es de 20 mm— y Δy es la longitud tomada en la dirección del eje Y—en este caso, la longitud del volumen de control es de 20 mm.

$$\Delta V = \int_0^{\Delta x} (p(x)_{i+2} - p(x)_i) * dx * \Delta y \quad (10)$$

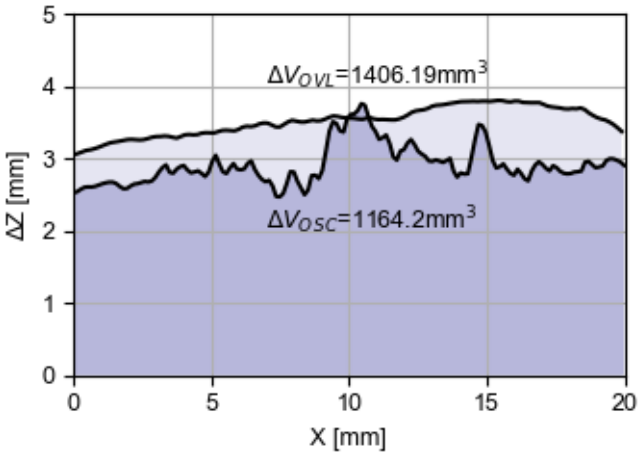


Figura IV-15. Cálculo del crecimiento volumétrico por capa de las capas 25 y 26 en las dos paredes

Aunque se aportaron más gotas de material en la pared oscilada dentro del volumen de control, el crecimiento volumétrico medio de capa (ΔVm) en la estrategia de oscilación es menor que en la estrategia solapada—1162 mm^3 y 1414 mm^3, respectivamente—como se muestra en la Figura IV-16. Esto se debe al diferente suministro térmico que soportan las dos paredes, creando una tasa de dilución diferente.

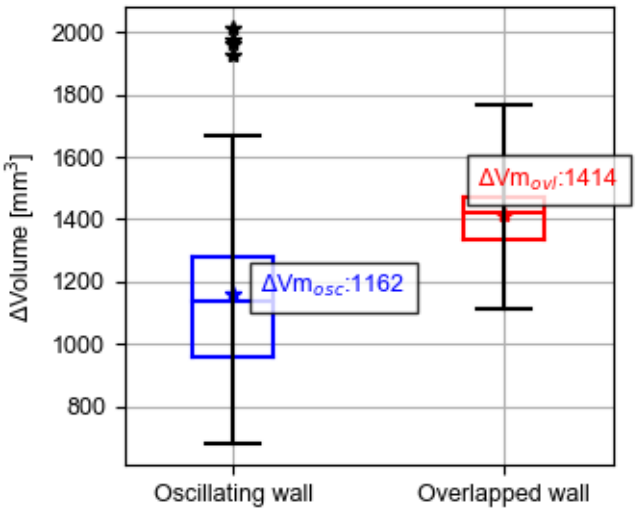


Figura IV-16. Crecimiento volumétrico medio por capa. Téngase en cuenta que las barras de error indican los valores máximos y mínimos

Para resaltar este punto, la Figura IV-17 presenta la evolución en el eje Z. Esta evolución se ha determinado midiendo la altura de la pared a lo largo del aporte de ambas estrategias. Como se puede observar en las primeras capas el crecimiento por capa es mayor en la pared oscilada que en la pared solapada

porque al inicio el sustrato se encuentra a temperatura ambiente y el suministro de energía y los tiempos de enfriamiento aún no son estables. Tras estas primeras capas, la pared solapada presenta un mayor crecimiento que la pared oscilada y, por tanto, se reduce el número de capas necesarias para obtener la altura deseada, 40 capas y 48 capas respectivamente. La incidencia de un calor más concentrado en la estrategia oscilatoria produce una mayor dilución en este caso, por lo que es necesario un mayor número de capas para el mismo crecimiento en la dirección Z.

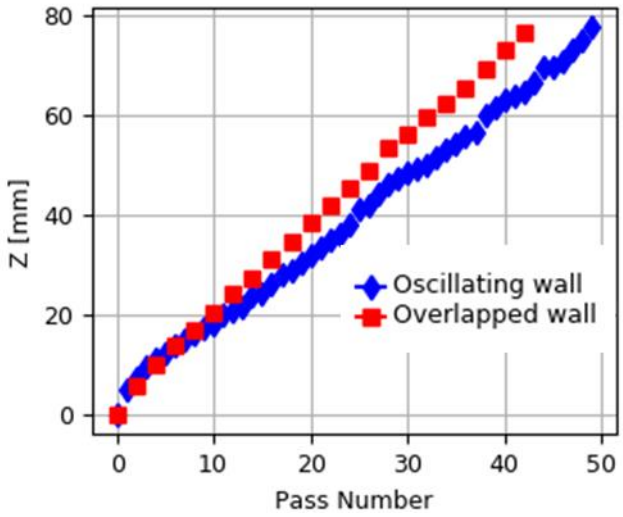


Figura IV-17. La altura de las paredes en el eje Z medido para representar la evolución del crecimiento volumétrico por capa en las dos paredes

Además, aunque la dilución se puede calcular como el porcentaje en áreas en un cordón simple (Ec. 6), también se puede calcular mediante la Ec. 11, donde $V_{aportado}$ es el volumen de material aportado y ΔV es el crecimiento volumétrico por capa:

$$Dilución = \frac{V_{aportado} - \Delta V}{V_{aportado}} * 100 \quad (11)$$

Finalmente, el número de gotas aportados por milímetro avanzado, el volumen de material aportado en el volumen de control, el crecimiento volumétrico medio por capa y la tasa de dilución de cada pared se representan en la Tabla IV-10. Como se puede observar, la pared oscilada presenta una mayor dilución debido al alto suministro y acumulación de calor que sufre. Los aspectos relacionados con el suministro de calor se tratan en la siguiente sección.

Tabla IV-10. Parámetros relacionados con crecimiento por capa en las dos paredes

	N_{gotas} (gotas/mm)	$V_{aportado}$ (mm^3)	ΔVm (mm^3)	Dilución (%)
Pared solapada	38,25	1669,51	1414	15,30
Pared oscilada	41,25	1808,64	1164	35,75

Para asegurar que el robot ha recorrido la trayectoria programada en la estrategia oscilatoria, la Figura IV-18 presenta el cordón generado en la primera capa. La anchura del cordón es ligeramente inferior a 20 mm de la pared objetivo, porque en la capa 0 el sustrato está frío y hay mayor crecimiento en la dirección Z y una ligera disminución de la anchura.

Las marcas apreciadas en la Figura IV-18, se generan debido a la trayectoria oscilada y midiendo la distancia entre dos marcas consecutivas se puede determinar la longitud de onda real del proceso. Cinco marcas del primer cordón están delimitadas por un recuadro rojo (Figura IV-18) y se analizan los valores de luminancia de la parte delimitada de la foto, determinando que la longitud de onda real es de 2,30 mm. Por lo tanto, como la longitud de onda teórica programada fue de 2,22 mm, se puede concluir que la trayectoria real está de acuerdo con la programada. La forma de zigzag completo no se observa en la superficie superior del cordón, ya que el valor teórico de la longitud de onda programada es pequeño, sin producir marcas en la dirección de avance porque son eliminadas por el siguiente movimiento.

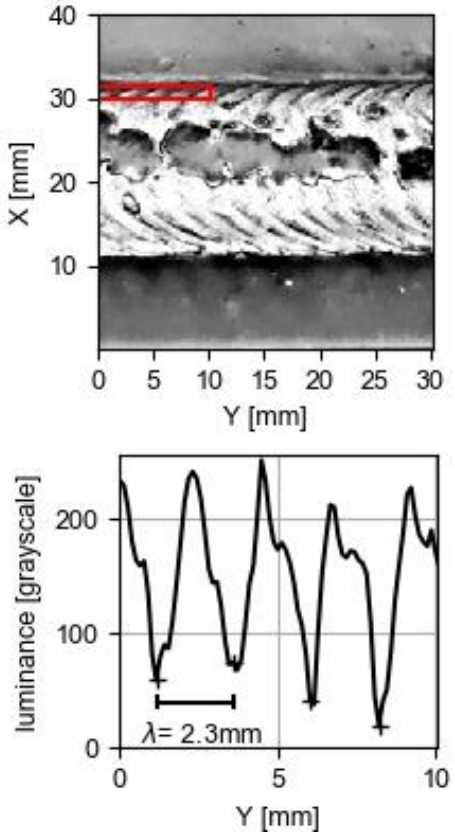
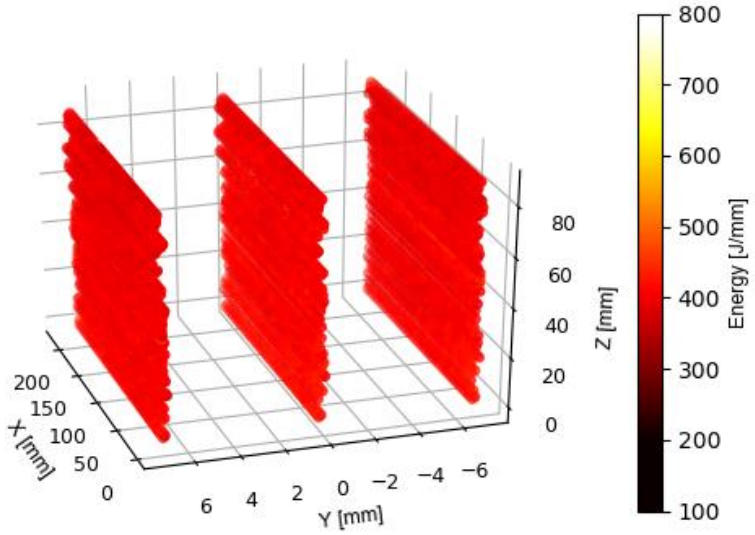


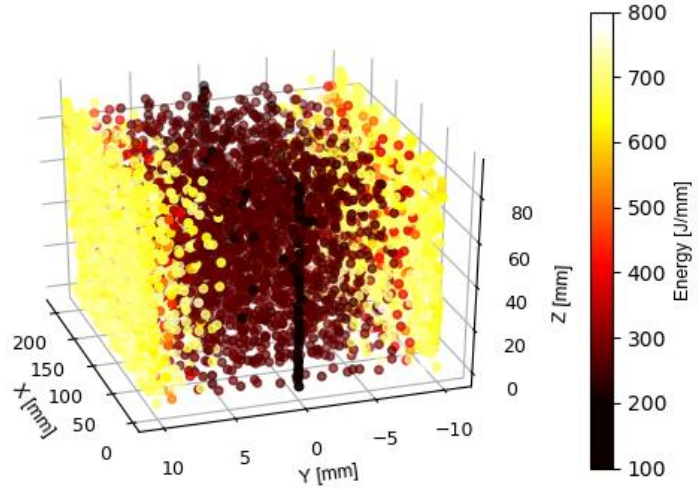
Figura IV-18. (arriba) Apariencia superior del primer cordón aportado con marcas en los laterales debidos a la longitud de onda de la trayectoria oscilatoria; (abajo) Valores de luminancia de las cinco marcas señaladas por el recuadro rojo

3.3.2 Análisis del suministro térmico (*Heat input, HI*)

Si bien el concepto de suministro de calor en la soldadura está bien definido, en la fabricación aditiva no es un concepto tan trivial. Por una parte, es posible calcular la energía instantánea suministrada (Ec. 5) que se muestra en la Figura IV-19. Esta energía instantánea se calcula como el producto de la intensidad y la tensión dividido por la velocidad de avance de la antorcha. Los valores de la intensidad y la tensión instantáneos se monitorizaron durante el proceso. La energía instantánea es constante en el caso de la estrategia solapada y es variable debido a la cinética del proceso en la estrategia de oscilación, como se muestra en la Figura IV-19.



(a)



(b)

Figura IV-19. Energía suministrada durante la fabricación de la pared (a) solapada y (b) oscilada

Por otro lado, para calcular el suministro de calor en volumen es necesario determinar un volumen de control (Δx, Δy, Δz) como el definido en la sección 3.3.1 que abarca todo el material aportado. También es importante cuantificar el suministro de calor en este volumen de control, teniendo en cuenta las múltiples pasadas. Observe que la energía suministrada se puede determinar cómo se describe en la Ec. 12 y el suministro de calor (*Heat Input, HI*) en volumen se puede expresar de acuerdo con la Ec. 13, donde I es la intensidad, V es la tensión y TS es la velocidad de avance.

$$Energía\ suministrada = \frac{I*V*\Delta y*Número\ de\ cordones}{TS} \quad (12)$$

$$HI_{3D} = \frac{Energía\ suministrada}{Volumen} = \frac{Energía\ suministrada}{\Delta x * \Delta y * \Delta z} \quad (13)$$

Para calcular y comparar el suministro de calor en volumen en ambas paredes, se necesitan calcular los valores medios de la intensidad y de la tensión que se tienen durante la fabricación de las paredes. Estos valores medios se muestran en la Tabla IV-11. Teóricamente, al introducir la misma velocidad de alimentación de hilo en ambos casos (8 m/min), los valores de intensidad y la tensión deben ser iguales ya que se utilizan fuentes sinérgicas, como se explicó anteriormente. Sin embargo, en la práctica, la longitud exacta del arco afecta a estos valores, incluso si el Stick-out es el mismo.

Además, la Tabla IV-11 muestra los parámetros relacionados con el suministro térmico que se calculan para el volumen de control. Vale la pena señalar que estos valores corresponden a dos capas porque dentro del volumen de control hay dos capas. Por último, es posible calcular el suministro de calor por milímetro cúbico crecido, que es mayor en la pared oscilada.

Tabla IV-11. Parámetros relacionados con el suministro térmico en las dos paredes

	I (A)	V (V)	Energía suministrada (J)	HI_{3D} (J/mm^3)
Solapado (ovl)	229,34	27,09	68818,94	48,67
Oscilado (osc)	244,45	26,61	78057,77	67,17

Como se puede apreciar en la Tabla IV-11, en la pared solapada la energía suministrada es menor, y se agrega en tres partes, teniendo tiempos de enfriamiento entre los cordones aportados. Por otro lado, la energía suministrada en la pared oscilante es mayor y se inserta, de forma continua, de una sola vez. Como resultado de que en la estrategia de oscilación la antorcha se mantiene durante mucho tiempo en la misma zona, la pared retiene más calor; es decir, la acumulación de calor es mayor. Por lo tanto, la dilución es mayor en la pared oscilada y, en consecuencia, el crecimiento medio por capa es menor y el número de capas necesarias para obtener la pared deseada es superior, como se verificó en el apartado anterior. Además, el suministro de energía también afecta a la microestructura y las propiedades mecánicas de las piezas, como han encontrado Rodrigues et al. [Rodrigues, 2019-a]. Esta investigación expresa que un alto suministro de calor da como resultado una menor ondulación de la superficie y una microestructura con mayor tamaño de grano. Este efecto también se refleja en esta tesis ya que, en las dos paredes fabricadas, se muestran variaciones en la microestructura y en las propiedades

mecánicas. Dirisu et al. [Dirisu, 2019] han notificado el mismo efecto, comparando la estrategia de oscilación con la estrategia de una sola pasada en aceros de alta resistencia estructurales de baja aleación.

3.3.3 Análisis del tiempo de enfriamiento y el tiempo de fabricación

Dependiendo del material y los parámetros del proceso WAAM utilizados, es necesario establecer un tiempo de enfriamiento entre pasadas para asegurar el crecimiento de la pieza y no presentar una acumulación excesiva de calor. De esta manera, el suministro de calor determina la temperatura entre pasadas. La temperatura entre pasadas, por definición, es la temperatura de la capa anterior hasta la cual hay que esperar justo antes del aporte de la siguiente. Además, el tiempo de enfriamiento depende de esta temperatura y por ello, afecta al tiempo total de fabricación y, en última instancia, a la productividad. Como han reportado Rodrigues et al. [Rodrigues, 2019-a], si esta temperatura es demasiado baja, el tiempo de enfriamiento puede extenderse por demasiado tiempo, haciendo impracticable el tiempo total de producción. Sin embargo, si la temperatura entre pasadas es demasiado alta, el aporte puede ser errático y puede inducir al colapso de la pieza. Por lo tanto, para analizar el tiempo de enfriamiento en ambas paredes, después del aporte de cada cordón, se mide la temperatura en el punto de partida del siguiente cordón utilizando el pirómetro. En ambos casos se requiere un tiempo de espera hasta que en este punto la temperatura sea inferior a 400 ºC (temperatura entre pasadas) y durante este tiempo se monitoriza la evolución de la temperatura.

Por un lado, en la pared solapada dentro de la misma capa (en este caso, capa 8), el tiempo de enfriamiento entre cordones aumenta considerablemente del primer cordón al tercero por acumulación de calor en la pieza, como se puede ver en la Figura IV-20 a. En la Figura IV-20 b, en cambio, se representa el tiempo de enfriamiento entre capas. Para calcular este tiempo en esta pared, se considera la suma de los tres tiempos de enfriamiento entre cordones de cada capa. Este tiempo de enfriamiento entre capas no varía mucho a lo largo de las diferentes capas, es decir, permanece constante. Aun así, es cierto que, en las primeras capas, este tiempo es más corto porque el sustrato al principio se encuentra a temperatura ambiente. El valor medio del tiempo de enfriamiento entre capas en este caso es de unos 115 s.

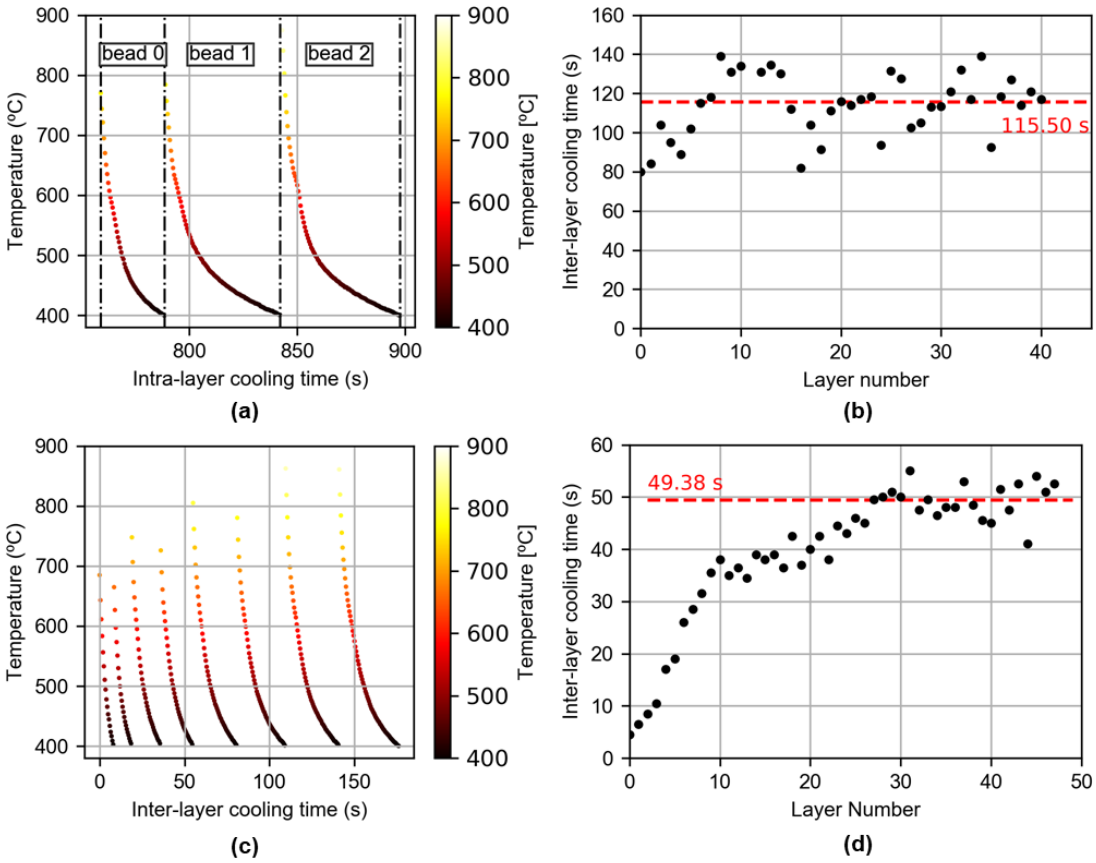


Figura IV-20. (a) Evolución de la temperatura durante el tiempo de enfriamiento entre cordones dentro de la octava capa de la pared solapada; (b) Evolución del tiempo de enfriamiento entre capas a lo largo de la pared solapada; (c) Evolución de la temperatura durante el tiempo de enfriamiento entre capas en las primeras ocho capas de la pared oscilada; (d) Evolución del tiempo de enfriamiento entre capas a lo largo de la pared oscilada

Por otro lado, en la pared oscilada, como puede verse en la Figura IV-20 d, el tiempo de enfriamiento entre capas es variable a lo largo de la pared. En las primeras capas, el tiempo de enfriamiento entre capas es más corto ya que el sustrato aún está frío, pero a medida que aumenta el número de capas aportadas, el tiempo de enfriamiento aumenta hasta estabilizarse alrededor de la capa 27. En este caso, el único tiempo de enfriamiento que se registra es el tiempo entre capas ya que en cada capa solo se aporta un cordón. La Figura IV-20 c muestra en detalle la evolución del tiempo de enfriamiento en las primeras ocho capas; observe el aumento en el tiempo de enfriamiento desde la primera capa hasta la octava capa. En este caso, el valor medio del tiempo de enfriamiento entre capas después de la estabilización es de unos 49 s.

Si bien la energía suministrada en el proceso en cada capa es mayor en la pared oscilada, como se ve en el apartado anterior, el tiempo medio de enfriamiento entre capas es menor en la pared oscilada porque esta energía

entra de forma diferente. Como se explicó anteriormente, en la pared oscilada, a diferencia de la pared solapada, toda la energía se suministra de una vez. Por otro lado, en la pared solapada, la energía se suministra en tres partes separadas por tiempos de enfriamiento. Por lo tanto, la suma de estos tres tiempos en la pared solapada es más larga que el tiempo de enfriamiento único de la pared oscilada.

En cuanto al tiempo de fabricación, se necesita más tiempo para fabricar la pared solapada que la oscilada, incluso aunque se aportan más capas en la estrategia de oscilación. Este tiempo de fabricación incluye el tiempo aportando y el tiempo de enfriamiento en ambas paredes, como se muestra en la Tabla IV-12. El tiempo de aporte es mayor para la pared oscilada porque la velocidad de avance media en todo el camino es menor y la distancia recorrida es similar. Por el contrario, como se demostró anteriormente, el tiempo total de enfriamiento es mayor para la pared solapada. Utilizando estos datos, se puede concluir que la estrategia de oscilación es más productiva que la estrategia solapada.

Tabla IV-12. Tiempos de fabricación

	Tiempo aportando	**Tiempo de enfriamiento**	**Tiempo de fabricación**
Solapada	46min 46s	75min 38s	2h 2min 24s
Oscilada	52min 36s	32min 29s	1h 25min 5s

3.3.4 Macroestructura, microestructura y durezas

Los diferentes parámetros de proceso afectan tanto a la precisión geométrica como a las propiedades metalúrgicas, macroestructurales, microestructurales y a las durezas [Zhang, 2003]. Además, dado que las piezas con tecnología WAAM se fabrican capa a capa, el suministro de calor generado en el proceso de fabricación provoca una refundido parcial en las capas anteriores. Como resultado, el material y el HAZ se someten a sucesivos ciclos térmicos. Dependiendo de la entrada de calor de cada cordón y la estrategia de aporte, pueden aparecer áreas con un historial térmico diferente. Por lo tanto, es evidente que diferentes regiones de la pieza tienen diferentes microestructuras. Teniendo en cuenta esta característica de la tecnología WAAM, Cunningham et al. [Cunningham, 2018] han estudiado las mejoras que pueden introducir, en este aspecto, los diferentes procesos auxiliares. En nuestro caso, debido a los diferentes ciclos térmicos creados debido a las diferentes secuencias y

trayectorias de aporte, se espera que la microestructura en la pared oscilada y la pared solapada sea diferente.

En estudios anteriores, Choi y Hill [Choi, 1978] analizaron la microestructura de los cordones de soldadura en ER70S-6, lo que es útil para analizar la microestructura de las paredes de este estudio. La Figura IV-21 presenta los ejes referenciados, que se tienen en cuenta para el análisis microestructural, y las microestructuras de las partes centrales de las paredes oscilada y solapada en los planos YZ y XY. En estos planos se puede observar una estructura de ferrita poligonal con granos ligeramente mayores en la pared oscilada que en la pared solapada.

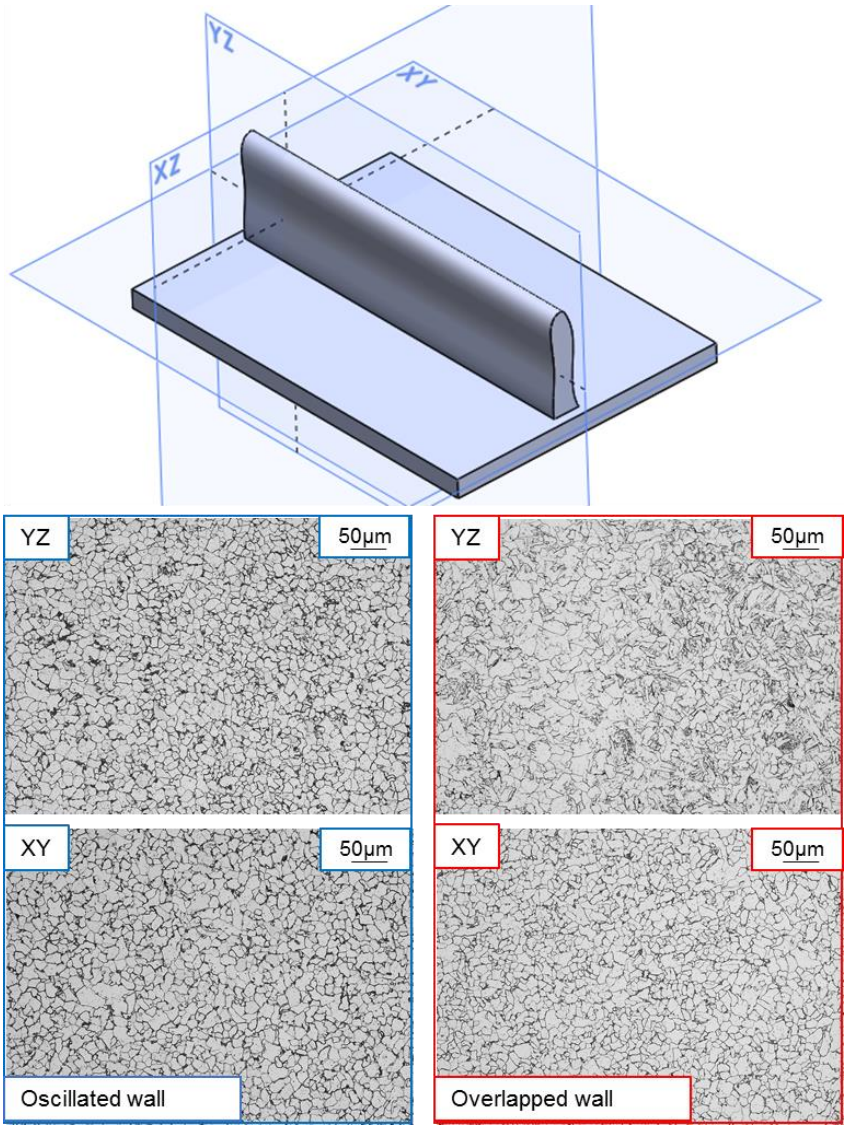


Figura IV-21. (arriba) Representación de la distribución de los ejes en la pared solapada y la pared oscilada; (izquierda) Microestructura de la pared oscilada en los planos YZ y XY; (derecha) Microestructura de la pared solapada en los planos YZ y XY

En la Figura IV-22 a y b, en cambio, se observan las macrografías de la parte superior e inferior de la pared solapada en la dirección transversal de la pared (plano XZ) (ejes referenciados en la Figura IV-21). En estas imágenes, cada cordón aprotado y el HAZ de cada uno son claramente visibles. En esta microestructura heterogénea se pueden diferenciar áreas con ferrita poligonal y ferrita acicular. El método de creación de ferrita acicular en cordones de soldadura fue revisado por Babu [Babu, 2004].

En la parte superior de la pared (Figura IV-22 a.1) se observa una mezcla de ferrita acicular, ferrita alotriomórfica y bainita ya que esta parte no ha experimentado el efecto térmico de la siguiente capa. Shassere et al. [Shassere, 2019] han obtenido una microestructura similar, en una pared de un único cordón. En la Figura IV-22 a.1, las áreas más oscuras corresponden a microestructuras de ferrita acicular y bainita, y las áreas más claras a microestructuras de ferrita alotriomórficas. En el resto de la pared se intercalan áreas de ferrita poligonal (Figura IV-22 a.3 y b.2) y áreas de ferrita acicular/bainita (Figura IV-22 b.1). Esta falta de uniformidad en la microestructura se debe al suministro de energía no uniforme provocada por las características de la estrategia de aporte. Es evidente que las partes de ferrita acicular no han recibido el efecto térmico de las pasadas sucesivas; sin embargo, la parte poligonal sí. En las Figura IV-22 a.3 y b.2, se puede ver ferrita poligonal con algo de perlita en los límites de grano (partes negras). Dirisu et al. [Dirisu, 2019] y Haden et al. [Haden, 2017] han obtenido la misma microestructura en la parte central en las paredes fabricadas de un único cordón en acero ER70S-6. Para más detalles, en la Figura IV-22 a.2 se puede ver la transición de la microestructura de ferrita acicular a la microestructura de ferrita poligonal.

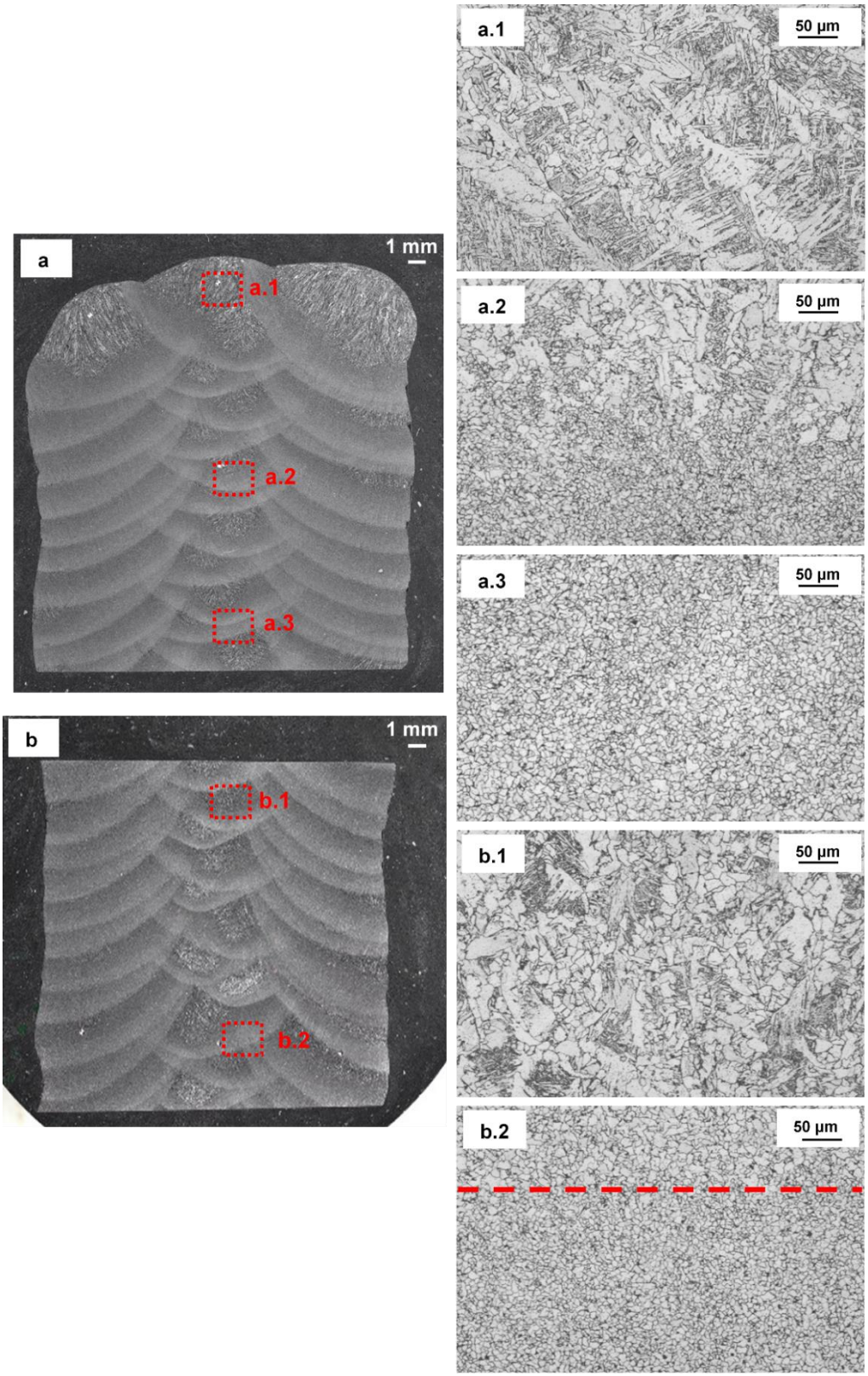


Figura IV-22. (izquierda) Macroestructuras de las partes superior e inferior de la pared solapada en dirección transversal (plano XZ); (derecha) Microestructuras de la pared solapada. Tenga en cuenta que las micrografías se sacan en las áreas marcadas con los recuadros rojos en las macrografías

Además, también se puede observar a lo largo de la pared una variación del tamaño de grano. Hay áreas con tamaño de grano fino, ASTM 12 y áreas con tamaño de grano más grande ASTM 10. En la Figura IV-22 b.2 se puede observar esta variación, siendo el tamaño de grano mayor en la parte superior que en la parte inferior. Esta variación también es consecuencia de la diferente historia térmica que han experimentado las diferentes áreas. Por ejemplo, el aumento del tamaño de grano en la zona afectada térmicamente (HAZ) se documentó ampliamente en la literatura previa [Choi, 1978], [Babu, 2004], [Haden, 2017].

Por otro lado, las Figura IV-23 c y d presentan las macrografías de la parte superior e inferior de la pared oscilada en la dirección transversal de la pared (plano XZ) (ejes referenciados en la Figura IV-21). En este caso, la microestructura es totalmente diferente. El suministro de calor capa por capa (detallado en la sección anterior) produce la formación de bandas. Estas bandas se diferencian fácilmente en las Figura IV-23 c y d y las distancias entre las bandas son iguales a las alturas de las capas. En la parte superior de la pared, como en el caso de la pared solapada, se observa una mezcla de microestructuras de ferrita acicular, ferrita alotriomorfica y bainita (Figura IV-23 c.1) porque esta parte no ha sufrido el efecto térmico de los sucesivos cordones aportados.

En el resto de la pared se aprecia una microestructura homogénea de ferrita poligonal con algo de perlita. Dado que solo se aporta un cordón oscilante en cada capa, el suministro térmico es uniforme en todas las capas y, por lo tanto, se observa esta homogeneidad en la microestructura. Aun así, se notan pequeñas variaciones del tamaño de grano a diferentes alturas de la pared, pero, en general, el tamaño de grano es 10 ASTM, mayor que en la estrategia solapada. Este tamaño de grano más grande se debe al efecto de la acumulación del calor y la consiguiente baja tasa de enfriamiento. El mismo comportamiento ha sido obtenido por Oliveira et al. [Oliveira, 2020] y Dirisu et al. [Dirisu, 2019] en sus investigaciones.

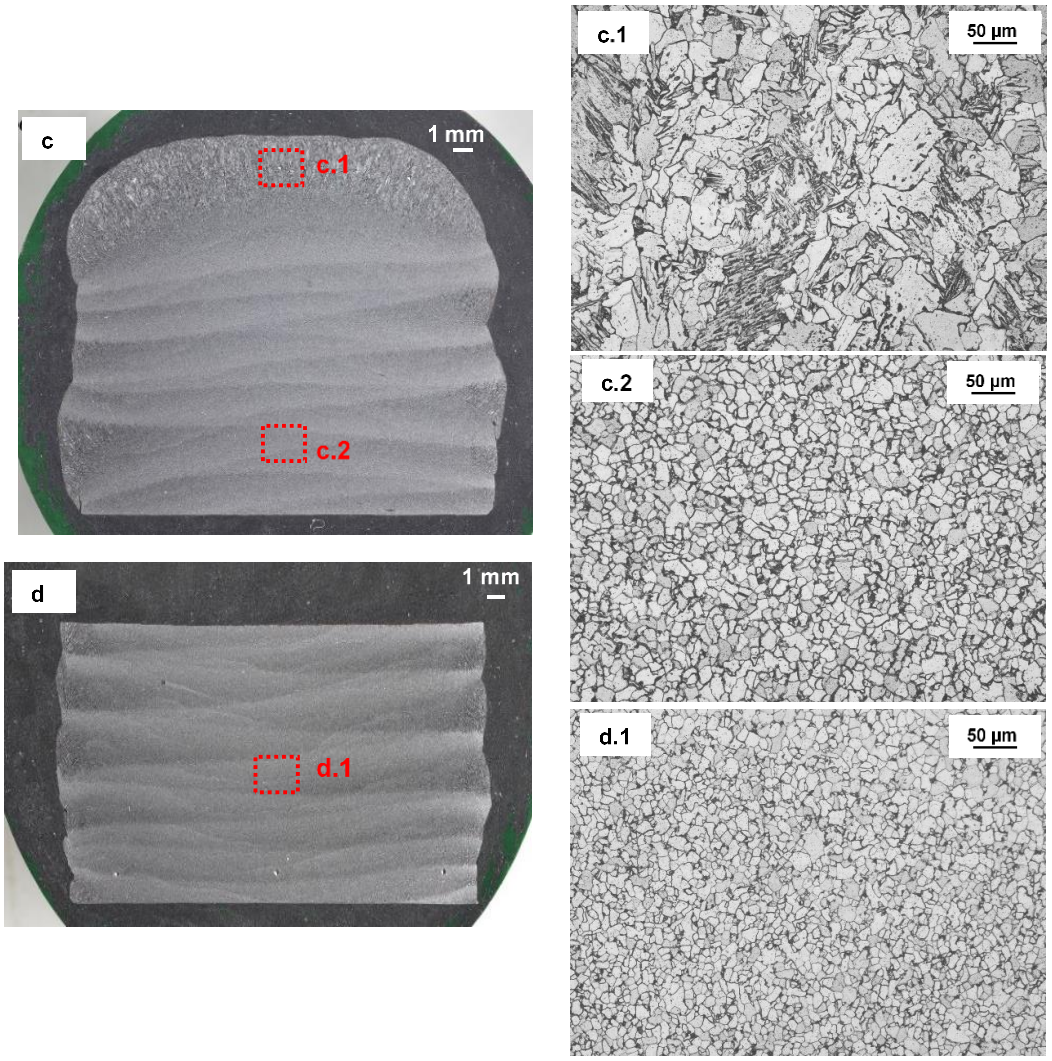


Figura IV-23. (izquierda) Macroestructura de las partes superior e inferior de la pared oscilada en dirección transversal (plano XZ); (derecha) Microestructura de la pared oscilada. Tenga en cuenta que las micrografías se sacan en las áreas marcadas con los recuadros rojos en las macrografías

Con respecto al análisis de las durezas, la dureza y la microestructura están estrechamente ligadas, y el mapeo de la dureza puede ilustrar el nivel de homogeneidad de la microestructura. En las paredes fabricadas, se realizaron pruebas de dureza Vickers en la parte superior, media e inferior de ambas paredes. Los valores medios obtenidos en cada parte se presentan en la Tabla IV-13. En ambas paredes, las medidas de dureza de la parte central y de la parte inferior se encuentran entre los límites de la norma para forja ASTM A36, la cual es similar en composición al acero ER70S-6. Además, Haden et al. [Haden, 2017] ha obtenido valores similares de durezas para paredes de un único cordón fabricadas en ER70S-6.

Tabla IV-13. Valores de dureza para las paredes fabricadas

	Durezas (HV)	
	Pared solapada	**Pared oscilada**
Arriba	163	154
Medio	146	136
Abajo	144	135

Como se puede apreciar en la Tabla IV-13, en ambas paredes existen valores de dureza más altos en la parte superior de la pared debido a la presencia de la microestructura de ferrita acicular. Esta ferrita acicular tiene mayor dureza debido a su estructura en forma de aguja. Además, a las tres alturas la pared solapada tiene valores de dureza más altos que la pared oscilada debido a su falta de uniformidad en la microestructura. Esta microestructura no uniforme intercala áreas de ferrita acicular y ferrita poligonal, obteniendo valores de dureza más altos si la hendidura está en el área de ferrita acicular. Para comprobar este fenómeno, se analiza la evolución transversal de la dureza en el interior de ambas paredes. Por lo tanto, en la parte media de ambos muros se realizaron seis medidas, y los resultados se muestran en la Tabla IV-14. Como se puede observar, los valores de dureza a lo largo de la pared solapada son menos uniformes que en la pared oscilada debido a su heterogeneidad en la microestructura.

Tabla IV-14. Estudio de la evolución de la dureza en la dirección transversal en las dos paredes fabricadas

	Durezas (HV)					
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Pared solapada	143	141	155	149	141	141
Pared oscilada	130	129	129	128	128	131

3.3.5 Evaluación de las propiedades mecánicas

El comportamiento mecánico de las piezas fabricadas mediante WAAM, mayoritariamente, dependen del proceso de fabricación, del flujo de calor, del gradiente térmico, del tamaño de grano resultante, de la microestructura y de la composición del hilo. Además, es bien sabido que los defectos de solidificación que pueden aparecer en las muestras WAAM, por ejemplo, porosidad, faltas de llenado, zonas frágiles localizadas y engrosamiento del grano en las zonas afectadas por el calor, pueden promover la dispersión en las propiedades mecánicas [Ghaffari, 2019]. En la Figura IV-24 se muestran las curvas tensión-

deformación de las probetas horizontales y verticales de ambas paredes, obteniendo curvas similares a las que se pueden encontrar en la literatura previa [Dirisu, 2019]. En comparación, en la dirección vertical, los valores de tensión ultima de rotura (*Ultimate Tensile Strength, UTS*) y límite elástico *(Yield Strength, YS*) son más altos en la pared solapada que en la oscilada, pero los valores de la elongación son menores en la pared solapada. Sin embargo, en la dirección horizontal, esta diferencia no es tan evidente. Los valores más altos de UTS e YS en la dirección vertical son una consecuencia del tamaño de grano más pequeño logrado en la pared solapada. Es bien sabido que el tamaño de grano pequeño aumenta la resistencia del material mediante mecanismos de refinamiento de grano. Dirisu et al. [Dirisu, 2019] también han obtenido un tamaño de grano más grande en una pared fabricada mediante la estrategia de oscilación que en una pared de un único cordón fabricado por el proceso WAAM basado en GMAW. Además, otro efecto del tamaño de grano sobre las propiedades mecánicas es el acortamiento de la zona de fluencia. En los detalles de la Figura IV-24, se puede ver que las zonas de fluencia son más grandes en las probetas de la pared oscilada en ambas direcciones. Un tamaño de grano más grande en la estrategia de oscilación da como resultado un aumento en la zona de fluencia debido al movimiento de bloqueo de dislocaciones en la prueba de tracción a temperatura ambiente.

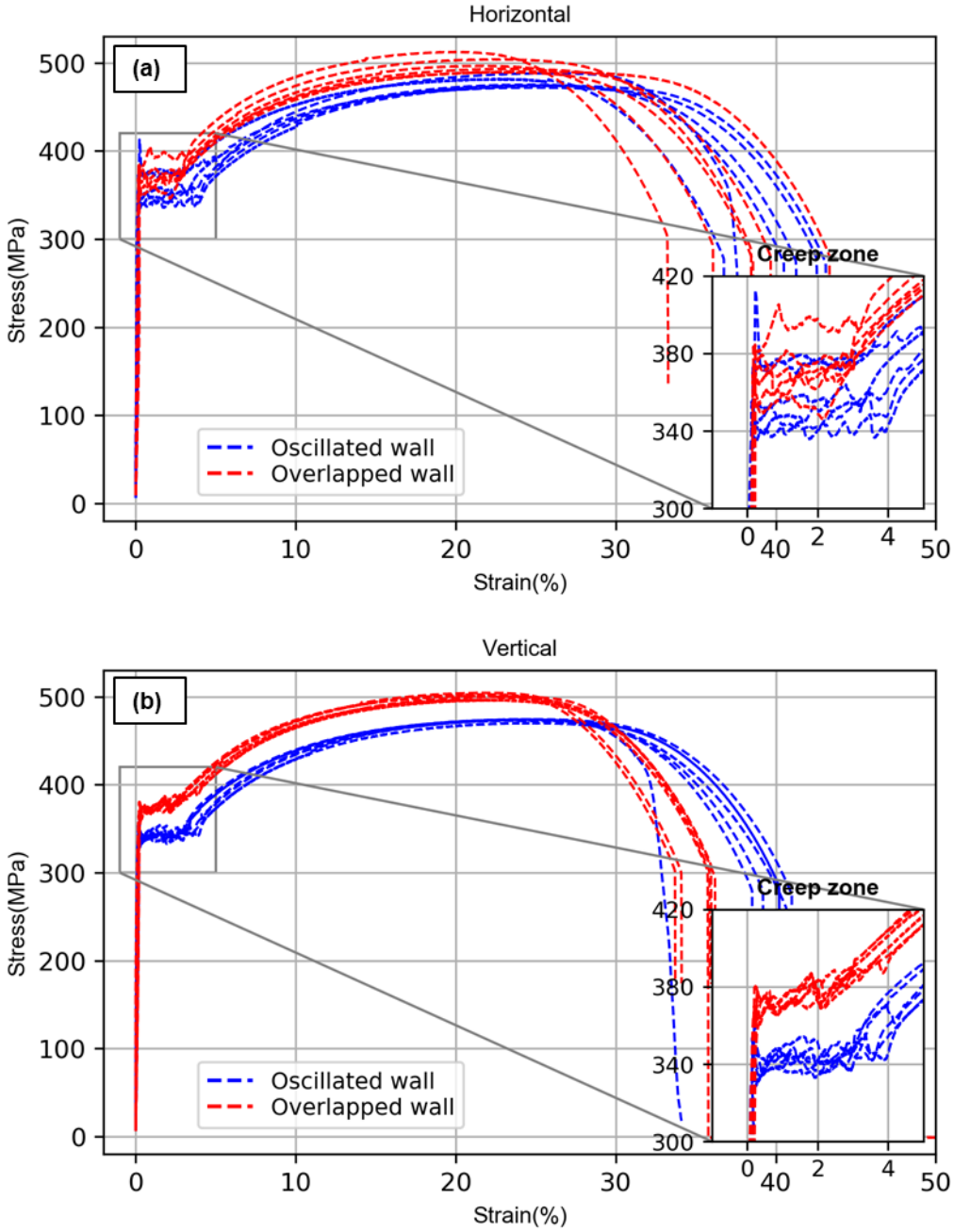


Figura IV-24. Curvas tensión-deformación de las probetas de las paredes oscilada y solapada (a) horizontales y (b) verticales

Además, la Tabla IV-15 resume los resultados de las pruebas mecánicas de las paredes osciladas y solapadas. Por un lado, aparecen los valores medios de la UTS, del YS y de la elongación y sus desviaciones estándar obtenidas del ensayo de tracción para ambas paredes. Los valores de la pared oscilante son similares a los valores de forja ASTM A36 y Ghaffari et al. [Ghaffari, 2019] y Shassere et al. [Shassere, 2019] han logrado resultados similares en sus paredes delgadas fabricadas por WAAM basado en GMAW en ER70S-6. Las

desviaciones estándares en los resultados de UTS e YS en la dirección horizontal son mayores que las observadas en la dirección vertical, como ya se puede ver en la Figura IV-24. Además, se ha realizado el ensayo Charpy para analizar la influencia de la estrategia de aporte en la tenacidad a la fractura. Aunque, en la literatura previa ([Choi, 1978] y [Babu, 2004]) los resultados de los ensayos Charpy muestran mayor dispersión que los resultados de los ensayos de tracción en aceros con bajo contenido de carbono, en el presente estudio, los resultados de tenacidad son similares en las dos paredes comparadas. Esta dispersión en la literatura previa se debe a las diferentes microestructuras obtenidas a lo largo de las piezas, por ejemplo, la ferrita acicular presenta resultados superiores de tenacidad que la ferrita poligonal [Grong, 1986]. En general, los valores medios observados en la estrategia solapada son similares a los observados en la estrategia oscilante. Además, estos resultados van en concordancia con los obtenidos en paredes fabricadas mediante WAAM basado en GMAW en acero ER70S-6 en literatura previa reportados en el capítulo II apartado 5.1 y ligeramente inferiores a los predefinidos por el proveedor del hilo para este material aportado.

Tabla IV-15. En las dos paredes, valores medios de los resultados obtenidos del ensayo de tracción y ensayo Charpy, sus desviaciones estándar y comparación con los valores mecánicos predefinidos por el proveedor del hilo

		Ensayo de tracción			**Ensayo Charpy**
		UTS (MPa)	**YS 0,2% (MPa)**	**Elong. (%)**	**Tenacidad a la fractura (J)**
Pared solapada	Horizontal	498 ± 9	368 ± 12	36 ± 4	193 ± 6
	Vertical	501 ± 3	368 ± 4	32 ± 1	
Pared oscilada	Horizontal	478 ± 6	354 ± 13	38 ± 3	195 ± 4
	Vertical	474 ± 1	338 ± 4	36 ± 2	
ER70 soldado	-	500-640	>420	28	160

3.3.6 Análisis de la geometría

En este apartado se analiza la geometría final de las paredes fabricadas utilizando las diferentes estrategias de aporte: estrategia oscilatoria y solapada. La planitud tal como la define la norma ASME Y14.5 "especifica una zona de tolerancia definida por dos planos paralelos dentro de los cuales debe estar la superficie", habiendo sido calculada como la diferencia entre la distancia mayor al valor medio y la distancia menor en la superficie superior de la pared.

La Figura IV-25 muestra las nubes de puntos (perfiles) que se obtienen para cada una de las lecturas realizadas por el láser instalado en el sistema utilizado. También se muestran las dos líneas envolventes que definen el perfil máximo y, sobre todo, el perfil mínimo utilizable. Por último, se muestra la línea de perfil medio entre estas dos envolventes. Como se observa, la planitud en el caso de la estrategia oscilatoria es mayor que la de la estrategia solapada. El perfil que se obtiene para el caso de la oscilación es parabólico. Por lo tanto, el material fluye hacia la zona central desde los bordes de la pared, aunque como se muestra en la Tabla IV-10 se aportan un mayor número de gotas en esa zona. Esto indica que el material fluye dentro del baño fundido desde la zona límite a la zona caliente, evitando la mayor tensión superficial que se localiza en la zona límite. El mismo efecto ha sido reportado por Ma et al. [Ma, 2019] obteniendo una pared más plana con una estrategia oscilatoria. Este comportamiento observado en el proceso GMAW es diferente al modelado para el caso del proceso PAW por Bai et al. [Bai, 2018], en el que se ha descubierto que el metal fundido fluía hacia dentro en la zona central y hacia fuera en las superficies laterales.

En cuanto a la forma que se tiene en la capa superior de las paredes, se observa que la pared obtenida mediante la estrategia oscilatoria es cuasi-simétrica, debido a la naturaleza del movimiento de la antorcha y al movimiento del metal en estado líquido. Por el contrario, en el caso de la estrategia solapada, se puede observar como el crecimiento de los cordones laterales es menor que el del cordón central debido a la configuración anisotrópica de la pared una vez fabricada cada uno de los cordones. La producción de una pared con una superficie superior homogénea es fundamental para el proceso de planeado posterior y la obtención de la pared acabada. En trabajos anteriores, Veiga et al. [Veiga, 2020] han demostrado cómo el planeado es el proceso de mecanizado más crítico en este tipo de paredes en comparación con el fresado tangencial.

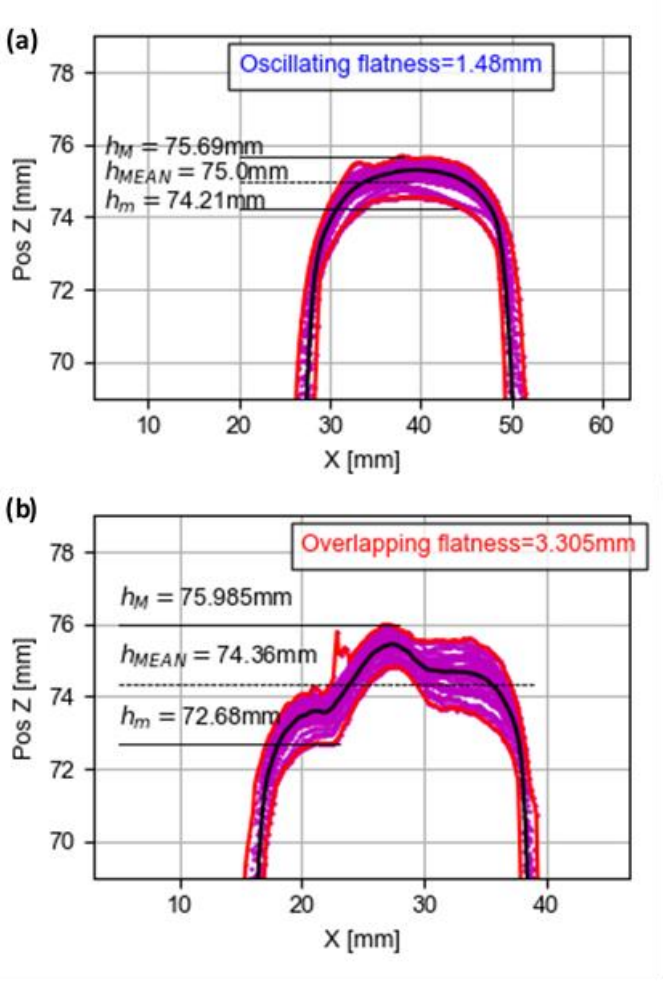


Figura IV-25. Secciones transversales de los perfiles y la determinación de la planitud en las partes superiores de las paredes fabricadas mediante (a) estrategia oscilatoria y (b) estrategia solapada

Las dimensiones de las paredes finales (paredes efectivas) vienen determinadas por el perfil mínimo medido, mostrado en la Figura IV-26, que tiene naturaleza parabólica, creando una sección transversal de la pared efectiva que tiene forma rectangular. Esta sección transversal es de carácter variable dependiendo de la altura y el ancho efectivos en los que se inscribe el cuadrado objetivo. En la Figura IV-26, la sección transversal efectiva en ambas estrategias se muestra en rojo para el ancho objetivo de 20 mm. La altura efectiva máxima a la que se obtendría una pared con esta anchura sería mayor en el caso de una estrategia oscilatoria, 72,2 mm frente a la altura de 71,3 mm observada en el caso de la pared solapada. Si bien esta diferencia no es muy grande, cabe señalar que, debido a la mayor homogeneidad del perfil en el caso de la estrategia oscilatoria, se obtiene una pared con la altura máxima efectiva posible mayor.

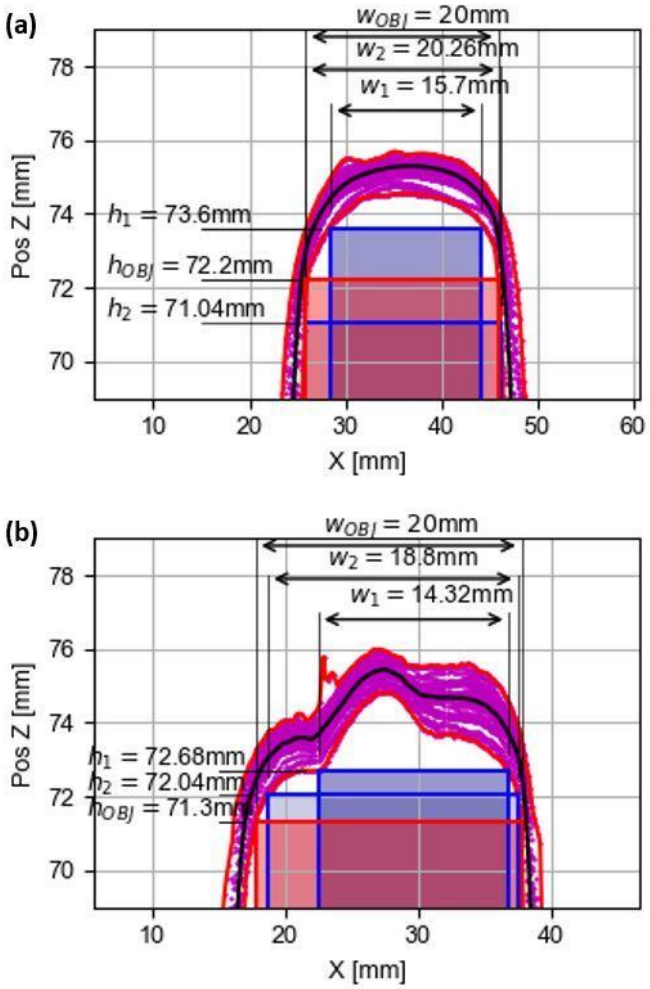


Figura IV-26. Cálculo del área transversal efectiva de la pared fabricada mediante estrategia (a) oscilada y (b) solapada

En la siguiente Figura IV-27 se muestra el valor del área transversal de la pared efectiva. Esta área se calcula en función al valor de la altura efectiva para los diferentes anchos de pared que se pueden obtener con ambas estrategias. La estrategia oscilatoria permite un mejor aprovechamiento del material aportado debido a la mayor homogeneidad del perfil medido. En general, esto produce una mayor área transversal efectiva en el caso de una estrategia oscilatoria, además de un menor volumen de virutas extraídas para obtener la pared final. Este hecho conlleva un menor coste en los posteriores procesos de mecanizado.

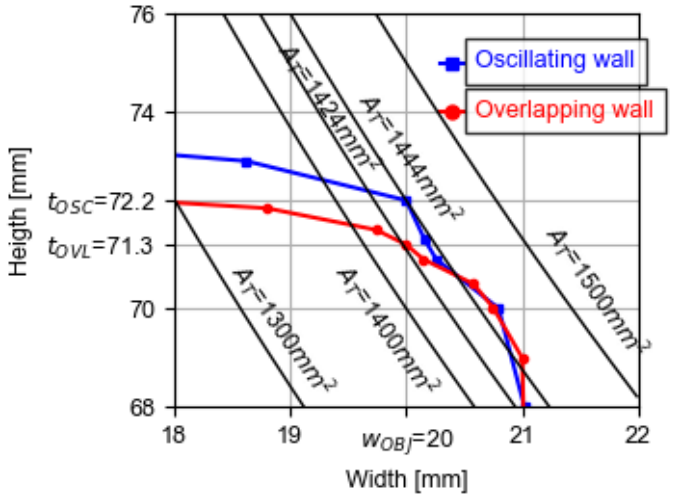


Figura IV-27. Cálculo del área transversal efectiva de las paredes fabricadas con diferentes estrategias según la altura y la anchura efectivas

3.4 Validación

Para la validación de todo lo analizado en este capítulo se han fabricado dos piezas en acero dulce ER70S-6 mediante el proceso WAAM basado en GMAW. Por un lado, el molde de paredes delgadas se ha fabricado para determinar la influencia de los diferentes modos de trabajo y demostrar la posibilidad de fabricar piezas con paredes delgadas mediante el proceso WAAM basado en GMAW. Por otro lado, se ha fabricado la pieza de los álabes para analizar la influencia de introducir diferentes tipos de estrategias de aporte en una única pieza.

3.4.1 Molde de paredes delgadas

En la Figura IV-28 se aprecia el diseño del molde de paredes delgadas que se ha fabricado para la validación de los resultados obtenidos previamente. En este diseño el grosor de las paredes del molde objetivo es de 4 mm. Por ello, el grosor de las paredes del molde fabricadas mediante WAAM tiene que ser de alrededor de 7-8 mm para poder mecanizar y obtener paredes finales de 4 mm.

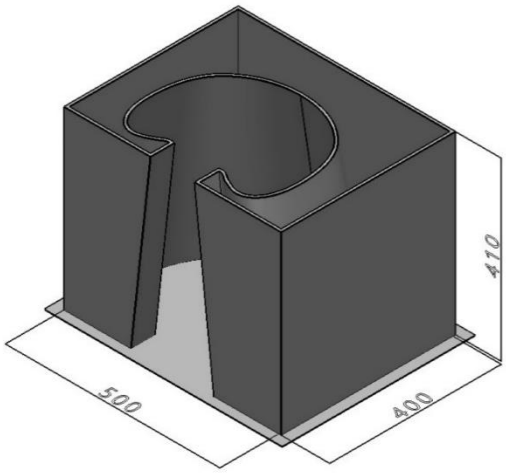


Figura IV-28. Diseño del molde con las dimensiones principales en mm

Teniendo en cuenta el diseño de la pieza para la fabricación de este molde se aporta el material de forma continua en un único cordón sin paradas. Las trayectorias se diseñan mediante el software PowerMill (Autodesk, Estados Unidos). En este programa se puede definir el grosor de capa y el tipo de trayectoria a seguir y mediante algoritmos internos el programa calcula las trayectorias deseadas. Para poder aportar el material de forma continua en la zona central de la pared recta trasera se sube en rampa la altura de una capa en z mientras se está aportando.

Estas trayectorias una vez definidas, se postprocesan directamente de PowerMill. Cada célula (robot o maquina CNC) tiene su propio postprocesador lo que permite generar el código necesario para cada máquina y colocar directamente la pieza a fabricar en la posición deseada dentro de la célula. En este caso se ha postprocesado la pieza para el sistema robótico Fanuc Arc Mate 100-iC (Fanuc, Japón) en mesa fija utilizado a lo largo de esta tesis.

La fabricación del molde se ha llevado a cabo con el aporte del hilo de acero ER70S-6 con diámetro 1,2 mm como en toda la experimentación previa. Como sustrato se han usado placas planas de 8 mm y un Stick-out de 17 mm. Los parámetros elegidos se pueden apreciar en la Tabla IV-16.

Tabla IV-16. Parámetros utilizados para la fabricación del molde de paredes delgadas

Número de capas	Modo	Job	WFR (m/min)	TS (mm/min)
1-20	Cold Arc	194	5	500
20-30	GMAW pulsado	9	5	500
Resto	GMAW pulsado	9	5	650

Como se puede observar, primero se han fabricado las primeras 20 capas con el modo de trabajo Cold Arc con 5 m/min de velocidad de alimentación de hilo, 500 mm/min de velocidad de avance y altura de capa de 1,6 mm. Pero el número de salpicaduras ha sido alto y la boquilla se llena de material rápidamente obstaculizando el paso del gas de protección y obteniendo una calidad del material aportado inadecuado por lo que se decide cambiar al modo GMAW pulsado. La anchura media del cordón obtenido y por lo tanto de las paredes del demostrador ha sido de 7,2 mm, lo que se encuentra entre los límites de anchura necesarios para poder obtener el demostrador objetivo después de mecanizar. Por último, se decide aumentar la velocidad de avance a 650 mm/min y la altura de capa se reduce a 1,3 mm. En todo el demostrador la tasa de aporte ha sido de 2,66 kg/h y en la Figura IV-29 aparece el demostrador fabricado.

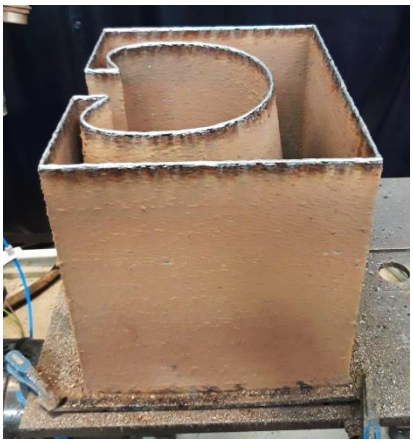


Figura IV-29. Molde de paredes delgadas fabricado en acero ER70S-6

Por lo tanto, la fabricación de la pieza se llevó a cabo con una combinación de dos modos de trabajo y, en consecuencia, con dos procesos diferentes de trasferencia de material. Esta estrategia fue considerada adecuada ya que en las primeras capas el modo Cold Arc suministro menos calor al sustrato reduciendo la deformación causada en la misma, pero se vio que se creaban muchas salpicaduras y se llenaba rápidamente de material la boquilla por lo que el gas de protección no entraba en el proceso adecuadamente. Por ello, se

concluye que el modo de trabajo Cold Arc solo es beneficioso para tasas de aporte muy bajas (en este demostrador ya estábamos en el límite superior de sus posibilidades) y para obtener paredes muy delgadas con valores de velocidad de avance lentas y diámetros de hilo pequeños. Por lo tanto, el modo Cold Arc queda solo relegado para la fabricación de piezas de paredes delgadas (3-5 mm) con gran exactitud geométrica. Además, es un proceso muy poco productivo en comparación con los otros modos GMAW disponibles.

Después de las primeras 20 capas se cambió al modo GMAW pulsado, donde se produjeron menos salpicaduras, pero el suministro térmico es mayor. Por ello, se incrementó la velocidad de avance para suministrar menos energía de manera que se evitara el colapso de la pieza. En la Figura IV-30 se pueden observar las gráficas de los datos monitorizados (intensidad, tensión y TS) durante la fabricación de esta pieza mediante el sistema robótico desarrollado en esta tesis. Esta información dio una descripción general tanto de la estabilidad del proceso como de la energía suministrada por unidad de longitud. La energía suministrada se puede calcular siguiendo la Ec. 5 como el producto de la intensidad (I) y la tensión (V) entre la velocidad de avance (TS), expresados en unidades J/mm.

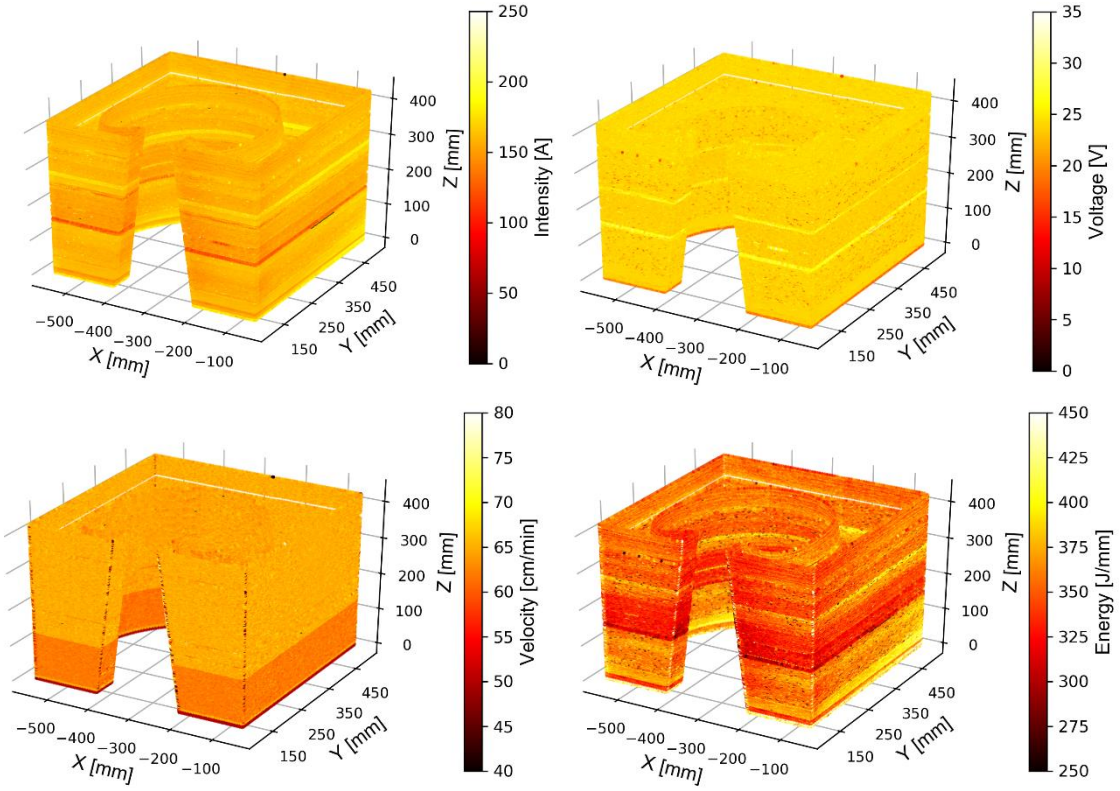


Figura IV-30. Los valores de intensidad, tensión y velocidad de avance monitorizados durante la fabricación del molde y la energía suministrada por unidad de longitud calculada

Como conclusión, con este demostrador se ha validado la fabricación de piezas con paredes delgadas mediante WAAM basado en GMAW. También se ha demostrado la relevancia del control del suministro térmico para prevenir el colapso de las piezas y no generar una deformación excesiva ni en el sustrato ni en la pieza misma. En este caso, este demostrador soporta una deformación aceptable dentro de los límites establecidos, tal y como se observa en los puntos medidos por la empresa Keytech (Keytech, Navarra) de la Figura IV-31. La empresa Keytech midió el molde una vez fabricado y se compararon los resultados con las dimensiones del diseño original.

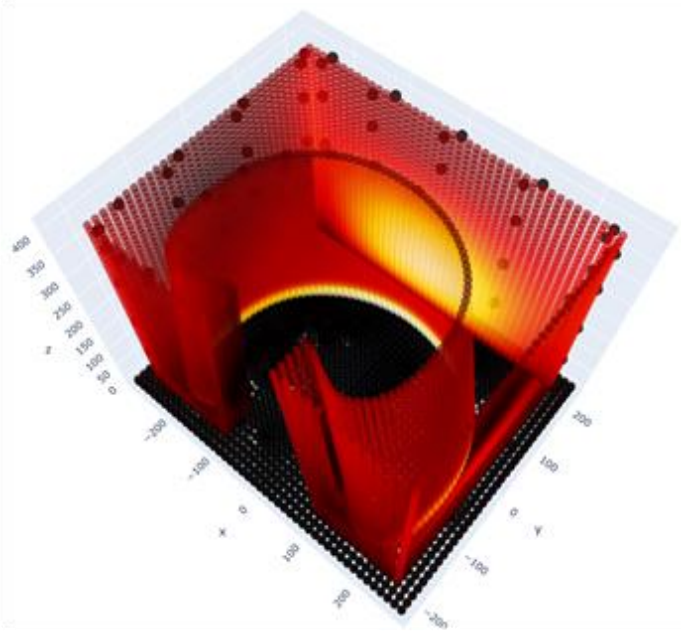


Figura IV-31. Puntos medidos de la superficie exterior de la pieza (puntos negros) y la forma teórica del molde

También se ha concluido que la fabricación continua es una posibilidad en este tipo de piezas sin tiempos de enfriamiento, por lo que el proceso se hace mucho más productivo. Aun así, esta posibilidad siempre estará ligada al calor que se suministra a la pieza, lo que está estrechamente relacionado con la cantidad de material que se aporta y también con el tamaño de la pieza que se quiere fabricar. Por lo tanto, la fabricación continua, en general, es adecuada para piezas grandes con paredes delgadas con una tasa de aporte no excesivamente alta.

3.4.2 Pieza tipo con álabes de un compresor

Como pieza de validación también se ha fabricado la pieza con álabes de la compañía ABC compressors (ABC compressors, País Vasco) en acero ER70S-

6 mediante la tecnología WAAM basado en GMAW. El diseño original de esta pieza se puede ver en la Figura IV-32.

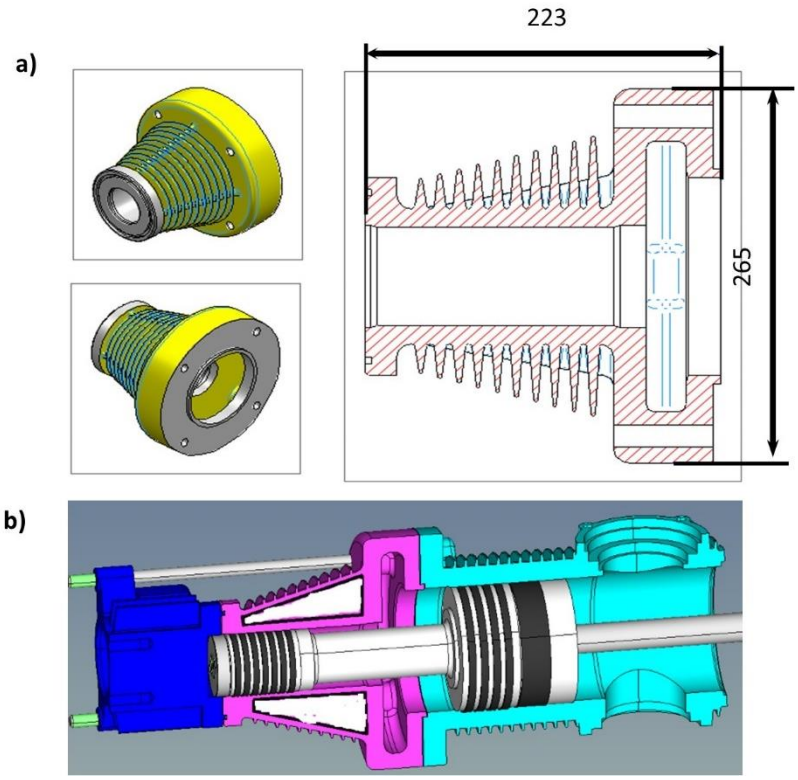


Figura IV-32. a) Diseño original de la pieza con álabes, b) montaje de la pieza con álabes (pieza en cuestión en rosa)

Empezando del diseño original se ha rediseñado la pieza para poder fabricarla fácilmente mediante la tecnología WAAM. El rediseño se puede observar en la Figura IV-33 (izq.), siendo esta pieza la que se obtiene después del mecanizado de la preforma fabricada mediante WAAM. A partir de este rediseño se ha creado la preforma para la fabricación de la pieza con álabes mediante la tecnología WAAM que se puede observar en la Figura IV-33 (dcha.). El diseño de esta preforma tiene en cuenta las demasías para el posterior mecanizado y se decide que el sustrato será parte de la pieza. Además, en la preforma para WAAM se ha decidido fabricar la pieza con aletas longitudinales para posteriormente poder mecanizarlas en forma triangular. Se ha descartado la fabricación de las aletas con forma triangular directamente debido al alto coste de programación que supondría en relación al ahorro de material y tiempo. La altura total de la pieza es de 240 mm.

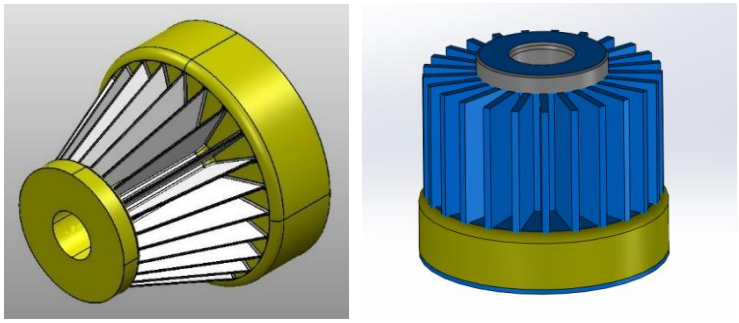


Figura IV-33. (izq.) Rediseño de la pieza con álabes para la tecnología WAAM; (dcha.) Preforma de la pieza con álabes para fabricación mediante WAAM

Una vez que se tiene el diseño de la pieza con álabes adecuado a la tecnología WAAM, se determinan las trayectorias y la secuencia de aporte. Por un lado, se han diseñado las trayectorias del anillo inferior, por otro lado, las de las aletas de la parte media y por último, las de la parte superior como se observa en la Figura IV-34. Para el diseño de las trayectorias se ha utilizado el software PowerMill (Autodesk, Estados Unidos).

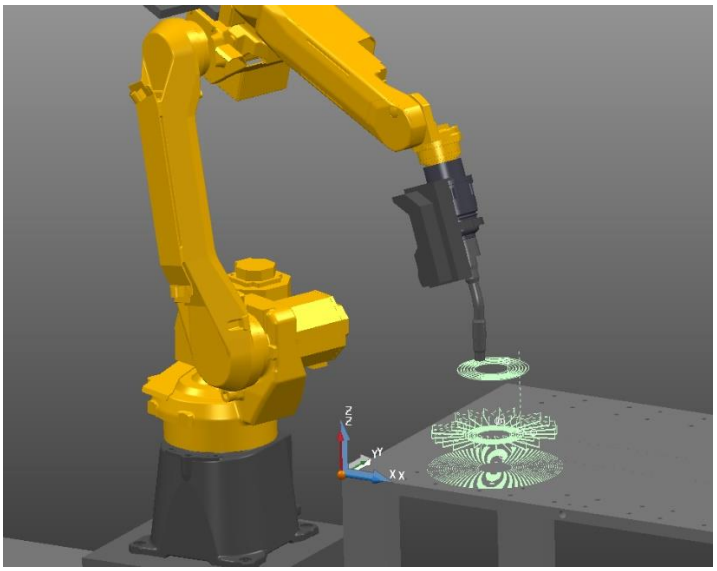


Figura IV-34. Trayectorias generadas para la fabricación de la pieza de validación con alabes

Como sustrato se ha usado una placa plana de acero F114 de 30 mm que será parte de la pieza y el Stick-out ha sido de 17 mm. Además, el modo GMAW (Job 9) pulsado se ha utilizado en toda la pieza. En cuanto a los parámetros de aporte, dado que se quieren conseguir tasas de aporte lo más altas posibles con un ángulo de mojado adecuado (alrededor de 30º), un solape aceptable, pero sin introducir un suministro térmico excesivo durante el proceso, se ha elegido el conjunto de parámetros que se aprecia en la Tabla IV-17.

En cuanto al anillo de la parte inferior, se ha seleccionado una estrategia de aporte continuo, solapando varios cordones para formar el anillo de 195 mm de

anchura y 70 mm de altura. Así, cada capa se aportará en círculos solapados y unidos. Después del aporte de cada capa se apagará el arco y se esperará hasta alcanzar una temperatura concreta (T_{espera}) para aportar la siguiente capa. Esto es posible en el sistema robótico diseñado en esta tesis gracias a la adquisición de las señales del pirómetro que mide la temperatura en tiempo real. Mediante el control desarrollado se puede controlar de esta manera el tiempo de enfriamiento que habría que esperar.

El material siempre se aporta de dentro hacia fuera, es decir, desde el círculo interior del anillo hasta el círculo exterior para que el calor no se acumule en el centro y la velocidad de avance también se ha reducido de dentro a fuera porque a causa del calor acumulado en el centro es necesario ir más rápido (Tabla IV-17). Estas capas se repiten hasta completar la altura del aro de 40 mm, ya que el sustrato también va a ser parte de la pieza con 30 mm, cumpliendo de esta manera los 70 mm necesarios. En esta programación de la trayectoria se considera que la anchura de cordón teórica es de 7 mm y el solape de 4,5 mm, el 65% de la anchura del cordón.

En la parte media, la fabricación de las aletas longitudinales y el anillo central se ha hecho capa a capa como se puede observar en la Figura IV-36. Primero, en las capas pares se ha hecho el cilindro central, de dentro hacia fuera uniendo círculos de manera continua y solapando cordones como en el caso de la parte inferior. Seguidamente, se han fabricado las aletas de un único cordón una a una aportando los cordones de dentro hacia fuera. En las capas impares, en cambio, se hacen primero las aletas de fuera hacia dentro y después el anillo interior, también de dentro a fuera, pero en la dirección opuesta a las capas pares. Se pueden observar en la Tabla IV-17, los parámetros utilizados en las diferentes zonas de esta parte. En este caso, no ha habido tiempos de espera porque no se alcanzado en ningún punto de inicio del aporte la temperatura de espera que se ponía.

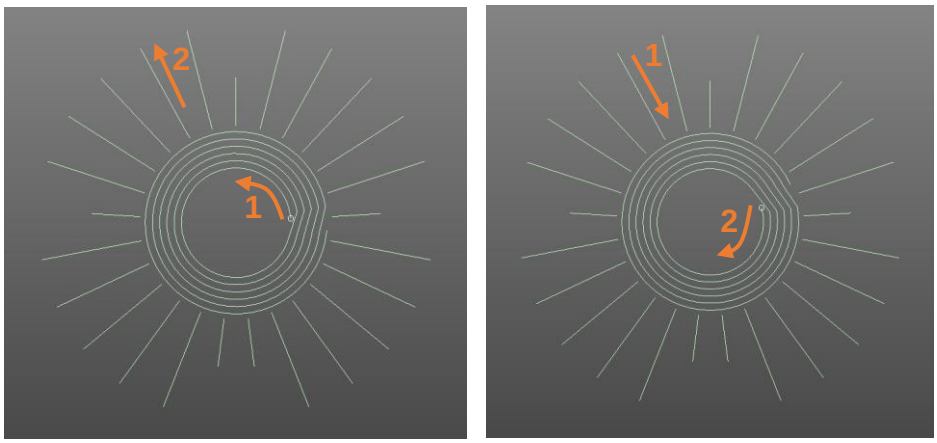


Figura IV-35. Trayectorias de la parte media: (izq.) Trayectorias de las capas pares; (dcha.) Trayectorias de las capas impares

Por último, en la parte superior se hace el aro de arriba capa a capa, aportando cada capa de manera continua, uniendo círculos de dentro hacia fuera para que se acumule menos calor en el centro. En estas capas tampoco ha habido tiempo de enfriamiento entre ellas.

Tabla IV-17. Parámetros de fabricación de la pieza de validación con alabes

	Zona	WFR (m/min)	DR (kg/h)	TS (mm/min)	Crecimiento por capa (mm)	T_{espera}
Parte inferior	Dentro	13	6,92	1560	2	350
	Medio	13	6,92	1440	2	350
	Fuera	13	6,92	1320	2	350
Parte media	Anillo interior	13	6,92	1560	2	-
	Aletas	10	5,33	1020/780	1,5	-
Parte superior	-	11	5,86	1320	1,5	-

En la Figura IV-36 se observa la pieza fabricada que finalmente consigue una altura de 240 mm con aproximadamente 123 capas. La pieza después de ser fabricada se ha mecanizado para obtener la geometría y las tolerancias finales deseadas.



Figura IV-36. Pieza con álabes fabricada y mecanizada

Durante la fabricación de esta pieza, el mayor problema ha sido la acumulación excesiva de calor, sobre todo en la zona central de la parte inferior. En primer lugar, se ha intentado fabricar la parte inferior entera de manera continua, sin esperar tiempos de enfriamiento entre capas con un sustrato de 10 mm de grosor. El calor acumulado ha sido excesivo (Figura IV-37) y, además, al aportar tanto material en un sustrato de un grosor reducido, el sustrato en la parte central se ha deformado totalmente convirtiendo impracticable la fabricación de la pieza en cuestión. Para solventar el problema, se cambian los parámetros de aporte como la velocidad de avance y se añaden tiempos de espera después de cada capa teniendo que hacer una fabricación no continua. Además, se cambia el sustrato de 10 mm de grosor por un sustrato de 30 mm que será parte de la propia pieza. Por ello, con esta pieza de validación ha quedado claro que la secuencia y la estrategia de aporte son de vital importancia, que los tiempos de enfriamiento son necesarios en este tipo de piezas y que el sustrato tiene que elegirse dependiendo de la naturaleza de la pieza a fabricar.

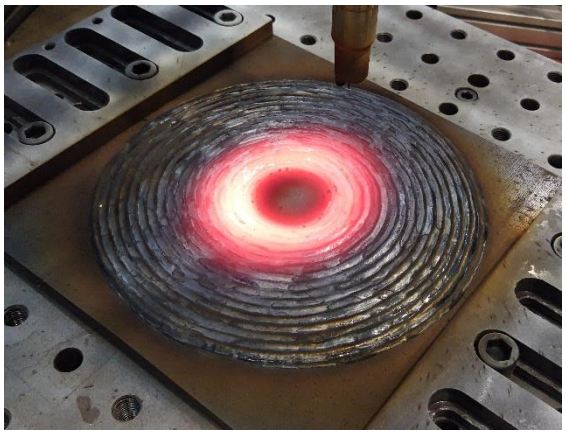


Figura IV-37. Exceso de calor durante la fabricación de la pieza con sustrato de grosor de 10 mm

Por último, durante la fabricación de esta pieza, en algunas partes, el crecimiento por capa no ha sido uniforme dentro de la misma capa, por lo que se han necesitado capas adicionales. Por ejemplo, en la parte media, el cilindro central ha crecido más que las aletas. Por ello, se ha añadido capas a todas las aletas para lograr la misma altura que el anillo interior. De esta experimentación se concluye que, dependiendo de la estrategia de fabricación de cada parte de la pieza, la pieza puede presentar zonas con crecimientos diferentes dentro de cada capa. Además, el control de altura diseñado e implementado en el capítulo III puede ayudar a que este problema no cause una fabricación defectuosa de la pieza, pero dentro de unos límites. Para conseguir un crecimiento uniforme en todas las capas de la pieza, el crecimiento de capa de cada estrategia se debe de parametrizar y controlar para poder fabricar una pieza automáticamente. En este capítulo se han parametrizado los crecimientos de capa de una pared simple, de una pared solapada triple y de una pared oscilada simple en acero ER70S-6, con velocidad de alimentación de hilo de 8 m/min y velocidad de avance de 650 mm/min (en el caso de la estrategia oscilatoria esta es la velocidad resultante, aunque la consignada sea 200 mm/min). Para otros materiales y otros ratios (relación entre WFR y TS) se debería de caracterizar este crecimiento.

4 Conclusiones

En este capítulo se ha expuesto toda la experimentación llevada a cabo en acero dulce ER70S-6 para el desarrollo de la tecnología WAAM basado en GMAW. Aunque la experimentación se haya llevado a cabo en un acero concreto, se considera que los resultados generales, excepto los resultados metalúrgicos y de propiedades mecánicas, serían extrapolables a otras aleaciones férricas. En concreto, entre estos resultados se encontrarían los parámetros y el método experimental utilizado.

Una conclusión concreta para el acero dulce ER70S-6 sería que en la superficie del material aportado se crea una capa de óxido de silicio, llamado cascarilla, que al no ser conductor crea problemas de encendido del arco de soldadura. Esta es la mayor desventaja de este tipo de materiales y en el caso del uso de este tipo de aceros para fabricación aditiva mediante WAAM basado en GMAW, es conveniente introducir en el proceso algún sistema para eliminarla antes de aportar la siguiente capa.

La experimentación en ER70S-6 se ha dividido en tres partes. En la primera, se fabrican cordones simples en acero ER70S-6 para estudiar la influencia de los principales parámetros del proceso WAAM basado en GMAW y los diferentes

modos de trabajo para aceros. Estas son las conclusiones principales obtenidas:

- El valor de la intensidad media aumenta linealmente con la velocidad de alimentación de hilo y en cambio, la tensión se encuentra cerca de un valor constante. Esto corrobora el funcionamiento del sistema sinérgico experimentalmente. En cuanto al Stick-out, esté afecta al valor de la intensidad media aun cuando la fuente de soldadura es sinérgica; cuanto mayor es el Stick-out menor es la intensidad. La tensión, en cambio, permanece constante a la variación del Stick-out. Esto demuestra la influencia del Stick-out analizado detalladamente en el capítulo III para el desarrollo del control de altura.
- Por un lado, se ha visto que, al aumentar la velocidad de alimentación de hilo, para la misma velocidad de avance, la energía suministrada por unidad de longitud es mayor. Esto ocurre debido a que al aumentar la velocidad de alimentación de hilo la intensidad crece linealmente. Por otro lado, con el mismo valor de velocidad de alimentación de hilo, al cambiar la velocidad de avance, esta no tiene ningún efecto en la intensidad y la tensión, pero si en la energía instantánea suministrada por unidad de longitud y, en consecuencia, en la forma del cordón obtenido (anchura y altura).
- El modo Force Arc consigue cordones con mayor penetración y dilución gracias al arco eléctrico de alta presión. Todo lo contrario, ocurre con el modo Cold Arc que con tasas de aporte bajas e inputs térmicos reducidos obtiene penetraciones poco profundas y diluciones pequeñas. En conclusión, para el proceso WAAM basado en GMAW no se recomienda el uso del modo Force Arc más allá de la primera capa ya que con el arco eléctrico de alta presión se obtienen penetraciones excesivas y puede acarrear el colapso de la pieza. Por otro lado, el modo Cold Arc queda relegado para la fabricación de piezas de paredes delgadas (3-5 mm) con gran exactitud geométrica. Por último, el proceso GMAW pulsado es adecuado para la tecnología WAAM.
- En los cordones de soldadura de acero ER70S-6, en todos los casos se tiene una microestructura de ferrita acicular. Esta es una microestructura muy habitual en aceros dulces debido a las altas velocidades de enfriamiento de los procesos de soldadura.

En segundo lugar, se ha analizado una pared simple en acero ER70S-6 fabricado mediante WAAM metalúrgica y geométricamente y estas son las conclusiones principales:

- En cuanto a la microestructura obtenida en paredes simples fabricadas en acero ER70S-6 mediante WAAM basado en GMAW, se aprecia una microestructura común de ferrita poligonal en las zonas que han sido afectadas térmicamente por el calor suministrado durante el aporte de las posteriores capas. En cambio, en las zonas a las que no ha llegado el calor de los siguientes aportes se obtiene una estructura de ferrita acicular.
- En el sistema robótico utilizado (diseñado en el capítulo III), gracias a la información acumulada por el escáner láser se puede saber el crecimiento por capa de una pared simple y la pared efectiva que se tiene después de mecanizar.

En tercer lugar, los efectos de las diferentes estrategias de aporte se investigan en paredes de acero con bajo contenido en carbono (ER70S-6) fabricados mediante WAAM basado en GMAW. Las dos estrategias estudiadas fueron la estrategia de solape de tres cordones lineales y la estrategia oscilatoria. Se compararon diferentes aspectos y parámetros del proceso para ilustrar una idea clara de las ventajas y desventajas de cada uno de ellos. Algunas conclusiones extraídas de esta comparación son:

- El proceso WAAM basado en GMAW es adecuado para fabricar piezas sin defectos en acero ER70S-6 empleando ambas estrategias estudiadas.
- Aunque se aporta más material en la pared oscilada dentro del volumen de control, el crecimiento volumétrico promedio de capa es menor. Este comportamiento se debe a una mayor concentración de energía y calor en el caso de la estrategia de oscilación, lo que produce una mayor penetración del material fundido en la capa preexistente. Por lo tanto, para fabricar las paredes deseadas, se necesitan más capas en la pared oscilada.
- El tiempo de enfriamiento (tiempo de inactividad que se tiene hasta que la pared alcanza la temperatura deseada antes de proseguir con el aporte de la siguiente capa) es menor en la pared oscilada porque, aunque el suministro de calor es mayor en esta pared, este calor se introduce de una sola vez. Como resultado, la productividad es mayor en la estrategia de oscilación, incluso si se aportan más capas.
- Debido a los diferentes ciclos térmicos creados en ambas paredes a causa de las diferentes secuencias y trayectorias de aporte, la microestructura en la pared oscilada y la pared solapada es totalmente diferente. En la pared solapada se observa claramente cada cordón

aportado y se obtiene una microestructura heterogénea con áreas intercaladas de ferrita poligonal y ferrita acicular. Esta ferrita acicular aparece en zonas a las que no llega el suministro de calor de la siguiente capa, como la última capa aportada, en la parte superior de la pared. Por otro lado, en la pared oscilada, la ferrita acicular también aparece en la última capa por el mismo motivo. En cambio, en el resto de la pared se observan bandas que corresponden al aporte de cada capa y se obtiene una microestructura de ferrita poligonal homogénea. En este caso, el tamaño de grano es mayor que en la pared solapada debido a la acumulación de calor sufrida.

- La dureza y la microestructura son propiedades estrechamente relacionadas. Como resultado, se obtienen mayores valores de dureza en la parte superior de ambas paredes donde está presente la microestructura de ferrita acicular. En comparación, los valores de dureza de la pared solapada son mayores que la pared oscilada debido a la heterogeneidad en la microestructura.
- Se logran propiedades mecánicas isotrópicas en ambas paredes fabricadas; es decir, en las direcciones vertical y horizontal, las propiedades mecánicas son similares. En la pared solapada, los valores de UTS y YS son mayores que los valores de la pared oscilada debido al tamaño de grano más pequeño obtenido. Este es un buen ejemplo de un mecanismo de endurecimiento por refinamiento de grano. En cuanto a la elongación obtenida, en el caso de la pared solapada, es inferior. En esta pared, en concreto, en el caso de la elongación sí que se muestra una direccionalidad dada, con valores inferiores en la dirección vertical. La estrategia de oscilación presenta valores más homogéneos en ambas direcciones debido a la distribución más homogénea de los cordones. Con respecto al estudio de impacto, las pruebas Charpy muestran resultados similares tanto en la estrategia solapada como en la oscilada.
- Aun así, a parte de las diferencias obtenidas con las dos estrategias, todos los valores de propiedades mecánicas son similares a los valores de las paredes fabricadas mediante WAAM basado en GMAW en acero ER70S-6 en literatura previa, reportados en el capítulo II apartado 5.1 y ligeramente inferiores a los predefinidos por el proveedor del hilo para este material aportado.
- La planitud en la capa superior se mejora gracias al uso de la estrategia oscilatoria (zig-zag). En la pared solapada se observa un mayor crecimiento de la pared en la zona central, lo que empeora el valor de

esta medida. Este hecho afecta al proceso de mecanizado de acabado de la superficie.

- Finalmente, el análisis de la geometría de la pared es importante porque determina la pared efectiva lograda e influye en el mecanizado final de las piezas. La pared oscilada presenta mayor planitud y un perfil parabólico, y es cuasi-simétrico, obteniendo una mayor homogeneidad en la geometría. El uso de la estrategia oscilatoria permite un mejor aprovechamiento del material logrando un menor coste en el mecanizado posterior.

Además, para la validación de los resultados obtenidos, finalmente, se fabrican dos demostradores reales y de un tamaño considerable en acero ER70S-6 utilizando la tecnología WAAM y el sistema robótico desarrollado en el capítulo anterior para ver la influencia de todos los parámetros analizados en estructuras más complejas. A lo largo del estudio realizado se demostró que el suministro de calor es un parámetro crítico en WAAM debido a su influencia en algunos aspectos del proceso, como la microestructura. En los demostradores fabricados también ha sido un parámetro crítico.

Por un lado, se ha visto que se pueden fabricar piezas con paredes delgadas mediante WAAM basado en GMAW de manera continua (sin tiempos de enfriamiento) pero es necesario prestarle mucha atención al suministro térmico para prevenir el colapso de las piezas y no tener una deformación excesiva ni en el sustrato ni en la pieza misma. En este caso, el demostrador de paredes delgadas fabricado soporta una deformación aceptable dentro de los límites establecidos. Además, gracias al aporte continuo la productividad del proceso aumenta en gran medida. Aun así, este tipo de aporte está limitado para piezas grandes con paredes delgadas con una tasa de aporte no excesivamente alta a causa de la excesiva acumulación de calor que podría ocurrir en otros casos.

Como muestra de lo nombrado, la pieza de un compresor fabricada como validación en este capítulo, no se podría fabricar nunca con una estrategia de aporte continuo, por el excesivo calor suministrado que lleva al colapso de la pieza y a la deformación excesiva del sustrato. Durante la fabricación de esta pieza, el mayor problema ha sido la acumulación de calor, sobre todo en la zona central de la parte inferior. Para solventar el problema, se cambian los parámetros de aporte como la velocidad de avance y se añaden tiempos de espera después de cada capa teniendo que hacer una fabricación no continua. Además, se emplea un sustrato de un grosor considerable que será parte de la pieza para evitar que el aporte de material deforme en exceso el sustrato. Por ello, con esta pieza de validación ha quedado claro que la secuencia y la

estrategia de aporte son de vital importancia, que los tiempos de enfriamiento son necesarios en este tipo de piezas y que el sustrato tiene que elegirse dependiendo de la naturaleza de la pieza a fabricar.

Por último, de esta experimentación también se concluye que, dependiendo de la estrategia de fabricación de cada parte de la pieza, la pieza puede presentar crecimientos diferentes dentro de la misma capa. En parte, el control de altura puede ayudar a controlar este problema, pero para conseguir un crecimiento lo más uniforme posible dentro de la misma capa, el crecimiento de cada estrategia de aporte se debe de conocer a priori para poder fabricar piezas automáticamente.

Todos estos resultados han sido publicados en los siguientes artículos: [Aldalur, 2020-a], [Aldalur, 2020-b] y [Casuso, 2021].

CAPÍTULO V

CAPÍTULO V: TECNOLOGÍA WAAM BASADO EN GMAW: ALUMINIO 5356

1 Introducción

El objetivo de este capítulo ha sido recopilar toda la experimentación llevada a cabo mediante el sistema robótico diseñado en el capítulo III en aluminio 5356 y desarrollar el proceso WAAM para este material. Para ello, en primer lugar, en este capítulo se ha estudiado la influencia de los diferentes modos de trabajo del equipo Titan XQ 400 AC puls (EWM, Alemania) más adecuados para la aleación de aluminio 5356: GMAW pulsado, Cold Arc y AC pulsado. Como anteriormente se ha mencionado el modo Force Arc se ha descartado para la tecnología WAAM y por ello, no se ha analizado en este capítulo. Para este estudio de modos de trabajo, previamente se ha fabricado una batería de cordones para definir los parámetros óptimos para fabricar tres paredes simples con los tres modos de trabajo. Además, esta experimentación previa se ha utilizado para diseñar modelos de anchura y altura de los cordones. Las tres paredes simples fabricadas se han analizado en términos de geometría, microestructura y porosidad. En segundo lugar, se han estudiado la microestructura y las propiedades mecánicas de una pared solapada fabricada mediante la tecnología WAAM basado en GMAW en este material. Por último, para la validación de los resultados obtenidos, se han fabricado dos demostradores.

2 Materiales y equipamiento

2.1 Materiales

En este capítulo el análisis que se ha llevado a cabo del proceso WAAM basado en GMAW se ha hecho en la aleación de aluminio 5356 (Al-Mg) que es un material particularmente atractivo, debido a sus aceptables propiedades mecánicas y a la resistencia a la corrosión. Aun así, las aleaciones de Al-Mg que contienen hasta 2-4% en peso de Mg pueden causar agrietamiento en caliente en el proceso de soldadura [Horgar, 2018].

El aluminio se ha introducido en el proceso en forma de hilo producido comercialmente (EN ISO 18273: S AL5356) con un diámetro de 1,2 mm. La composición de este hilo se puede ver en la Tabla V-1. A lo largo de la experimentación como sustrato se han usado placas planas de aluminio 5083 de 15 mm y 30 mm y antes de empezar cualquier aporte, el sustrato se ha pulido y limpiado en todos los casos para eliminar óxidos e impurezas.

Tabla V-1. Composición química del hilo Al5356 en peso (%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Be	Al
0,05	0,11	0,001	0,16	4,8	0,12	0,001	0,081	0,0001	bal.

El argón es el gas protector estándar para la fabricación de piezas de aluminio con tecnología WAAM, aunque algunos estudios también han propuesto gas de nitrógeno para el mismo propósito [Li, 2020-b]. En esta tesis, para las aleaciones de aluminio se ha utilizado el gas 99,99% Ar con un caudal de 30 l/min y el Stick-out se fijó en 15 mm.

2.2 Equipamiento

El Set-up que se ha utilizado en toda la experimentación llevada a cabo en este capítulo es el que se ha desarrollado y detallado en el capítulo III.

2.3 Análisis de los modos de trabajo sinérgicos GMAW para aleaciones de aluminio: Batería de cordones únicos y paredes simples

Con el objetivo de caracterizar los modos de trabajo, se han realizado una serie de ensayos en cordones únicos. Así, se han comparado tres modos de trabajo diferentes de la fuente de soldadura sinérgica: GMAW pulsado, Cold Arc y AC pulsado. Para ello, se han fabricado una batería de cordones únicos y una pared simple con cada modo de trabajo. Esta experimentación se ha llevado a cabo en sustrato de aluminio 5083 de 15 mm.

Los parámetros utilizados para fabricar la batería de cordónes únicos se pueden ver en la Tabla V-2 entendiendo el ratio como la relación entre la velocidad de alimentación de hilo y la velocidad de avance. Debe de tenerse en cuenta que la velocidad de alimentación de hilo para aleaciones de aluminio 5000 puede variar entre 1,5 m/min y 22 m/min para el modo GMAW (Job 76) pulsado; entre 3 m/min y 8 m/min para el modo Cold Arc (Job 56); y entre 2 m/min y 12 m/min para el modo AC pulsado (Job 392). Por lo tanto, las velocidades de alimentación de hilo que se han elegido para la batería de cordones únicos (4 m/min y 8 m/min) estan entre los límites posibles de los tres modos. Además, se han definido 4 niveles de velocidad de avance diferentes, obteniendo ratios de 4, 7, 10 y 12.

Tabla V-2. Parámetros de fabricación de la batería de cordones únicos para los tres modos de trabajo comparados: GMAW pulsado, Cold Arc y AC pulsado

N. cordón	WFR (m/min)	TS (mm/min)	Ratio (WFR/TS)	DR (kg/h)
1	4	1000	4	0,72
2	4	570	7	0,72
3	4	400	10	0,72
4	4	330	12	0,72
5	8	2000	4	1,44
6	8	1140	7	1,44
7	8	800	10	1,44
8*	8	650	12	1,44

* Parámetros de fabricación de las paredes

Por otro lado, se ha fabricado una pared de un solo cordón, de 80 mm de largo y 50 mm de alto, con cada modo de trabajo. El aporte ha sido bidireccional en estas paredes, lo que significa que capas consecutivas se han aportado en direcciones opuestas. Se han elegido los parámetros del octavo cordón de la tabla anterior para fabricar estas paredes sin necesidad de tiempos de enfriamiento entre capas. Estos tiempos se han determinado gracias al pirómetro instalado en la antorcha de soldadura y se ha esperado hasta obtener 250ºC en el punto de partida del siguiente aporte. Sin embargo, gracias a la gran capacidad de disipación de calor del aluminio, esta temperatura en todos los casos se ha alcanzado rápidamente sin necesidad de tiempos de enfriamiento.

Durante la fabricación de la batería de cordones únicos, cada cordón se ha escaneado después de su fabricación con el escáner láser que compone el set-up nombrado en el capítulo III, para determinar su forma geométrica. Se han elegido nueve perfiles entre los generados por el láser durante el proceso de escaneo, obteniendo una nube de puntos que representa la forma geométrica transversal del cordón. De cada uno de estos perfiles se ha calculado la altura y la anchura y luego se han sacado los valores medios. Además, al fabricar las paredes simples después del aporte de cada capa, las paredes también se han escaneado para determinar el crecimiento por capa.

2.4 Análisis de la microestructura y de las propiedades mecánicas: Pared solapada

En el proceso de fabricación de la pared solapada en aluminio 5356, primero, se ha amarrado el sustrato de 15 mm de aluminio 5083 a la mesa para iniciar el aporte. La longitud de la pared fabricada ha sido de 220 mm. En esta experimentación se ha utilizado el modo de trabajo GMAW (Job 76) pulsado.

Esta pared se ha fabricado solapando tres cordones y superponiendo 60 capas encima del sustrato. El solape entre los cordones ha sido del 65% de la anchura (8,255 mm) y durante la producción, capas alternantes se han aportado en direcciones opuestas para poder compensar y no perder tolerancia geométrica. Al fabricar la pared solapada entre cordones consecutivos se ha esperado un periodo de tiempo para no tener un suministro térmico excesivo en la pieza. En este caso, este periodo ha sido de 50 s.

Además, dado que se quieren conseguir tasas de aporte (DR) lo más altas posibles con una buena penetración y ángulo de mojado adecuado, pero sin tener un suministro térmico excesivo, se ha elegido el conjunto de parámetros más adecuado determinando diferentes velocidades de alimentación de hilo para cada capa (Tabla V-3) y velocidad de avance común de 800 mm/min.

Tabla V-3. Parámetros de fabricación de la pared solapada

Número capa	WFR (m/min)	DR (kg/h)	Solape (%)	Crecimiento por capa (mm)	Tiempo de espera (s)
1-2	16	2,89	65 (8,22 mm)	1,5	50
Resto	12	217	65 (8,22 mm)	1,5	50

Por último, para monitorizar la forma geométrica de cada capa, después de haberlos aportado, han sido escaneados mediante el escáner láser. Este láser ha escaneado cada dos capas dado que se ha considerado que esta información es suficiente para caracterizar el crecimiento de los cordones.

2.5 Métodos para la caracterización metalúrgica y mecánica

En cuanto al análisis metalúrgico del aluminio 5356, en primer lugar, se han seccionado transversalmente las paredes simples, la pared solapada y los cordones de soldadura en la parte central y se han pulido mecánicamente. Sucesivamente, se ha realizado el ataque electrolítico de Barker para revelar el grano, aplicando 14 V durante 120 s. Después de preparar cada muestra, se han obtenido las macrografías y las micrografías con el microscopio Nikon Eclipse MA200 (Nikon Metrology Inc, Bélgica).

Además, en las partes centrales de las paredes simples se ha llevado a cabo el análisis de difracción por retroceso de electrones (*Electron Back-Scattered Diffraction*, EBSD) con un microscopio SEM JSM-5910LV (JEOL Ltd., Japón) equipado con un detector EDX Oxford INCA X-act y un detector Tetra (Oxford Instruments, Reino Unido). Finalmente, la porosidad en estas paredes se ha medido a partir de las micrografías de las muestras no atacadas utilizando un programa de procesamiento de imágenes. Este programa diferencia diferentes zonas de las fotos (poros y resto del material) por colores y según el color de cada zona mide la porosidad de las piezas fabricadas.

Las mediciones de dureza Vickers se han realizado a temperatura ambiente, utilizando la máquina Duramin A-300 (Struers, Dinamarca), de acuerdo con la norma ISO 6507-1 [UNE- EN ISO 6507-1]. Las dimensiones de las probetas de tracción se han mecanizado según la norma ISO 6892-1 [UNE-EN ISO 6892-1]. La máquina donde se han realizado los ensayos de tracción uniaxial a temperatura ambiente ha sido la Instron 5585H (Instron, Estados Unidos) con una carga máxima de 100 kN y equipada con un extensómetro de contacto (Instron EX2620-602, Instron, Estados Unidos). Las pruebas de Charpy se han realizado a temperatura ambiente en una máquina Ibertest PIB300 de péndulo de prueba de impacto (Ibertest, España), siguiendo la norma ISO 148-1 [UNE-EN ISO 148-1]. La distribución de probetas se puede apreciar en la Figura V-1.

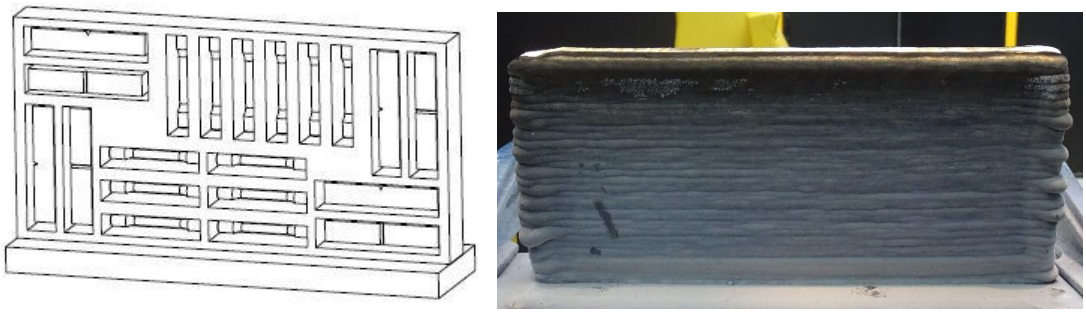


Figura V-1. (izq.) Distribución de probetas en la pared solapada; (dcha.) Pared fabricada

3 Resultados y discusión

3.1 Modos de trabajo sinérgicos GMAW para aleaciones de aluminio

Como se ha mencionado previamente, dependiendo del modo de trabajo, la fuente de soldadura GMAW sinérgica introduce señales de intensidad con diferentes formas de onda en el hilo de alimentación. Las características de la señal de intensidad no solo dependen del modo de trabajo elegido, también dependen del material, del gas de protección y el diámetro del hilo. De esta

forma, habiendo establecido el modo de trabajo y los parámetros antes mencionados, la señal de intensidad solo se rige por la velocidad de alimentación de hilo establecida. Por otro lado, la tensión está impuesta por la intensidad y aunque es pulsado, se mantiene cerca de un valor constante.

Específicamente, las señales de intensidad de los modos de trabajo GMAW pulsado, Cold Arc y AC pulsado para la aleación de aluminio 5356 se representan en la Figura V-2, con 99,99% Ar como gas protector, d = 1,2 mm de diámetro de hilo y WFR = 8 m/min. Estas señales se han adquirido con el equipamiento de adquisición de alta frecuencia descrito en el capítulo III.

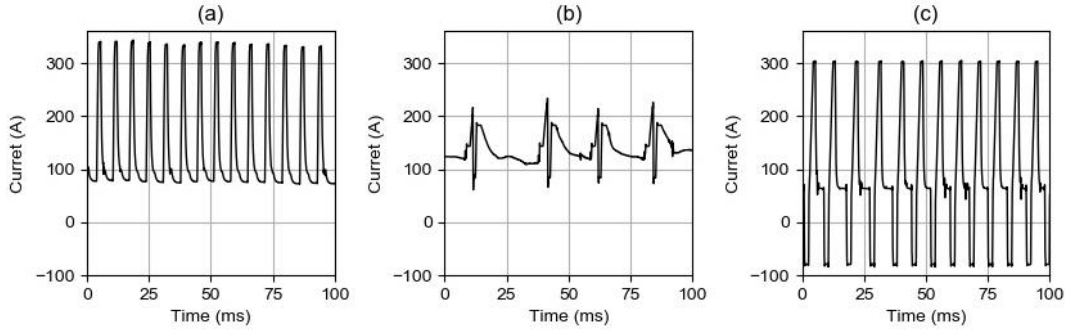


Figura V-2. Señal de intensidad con WFR=8 m/min: a) GMAW pulsado, b) Cold Arc, c) AC pulsado

Las señales de los tres modos de trabajo, ampliadas y superpuestas entre si, se pueden observar en la Figura V-3 a. Las tres señales son completamente diferentes. Las señales de GMAW pulsado y de Cold Arc solo tienen valores positivos, a diferencia de la señal de AC pulsado, cuya polaridad es variable. Además, a partir de la densidad espectral de potencia (*Power Spectral Density*, PSD) representada en la Figura V-3 b, se puede concluir que la frecuencia de la señal de GMAW pulsado es de 140 Hz y la frecuencia de la señal de AC pulsado de 132 Hz. Sin embargo, la señal de Cold Arc dependiendo de la formación de la gota produce una señal con pulsos sin carácter periódico, por lo que el parámetro de frecuencia es incierto. Sin embargo, es evidente que la señal de intensidad de Cold Arc tiene menos pulsos en el mismo período que los otros dos, es decir, la frecuencia media es menor que en los otros.

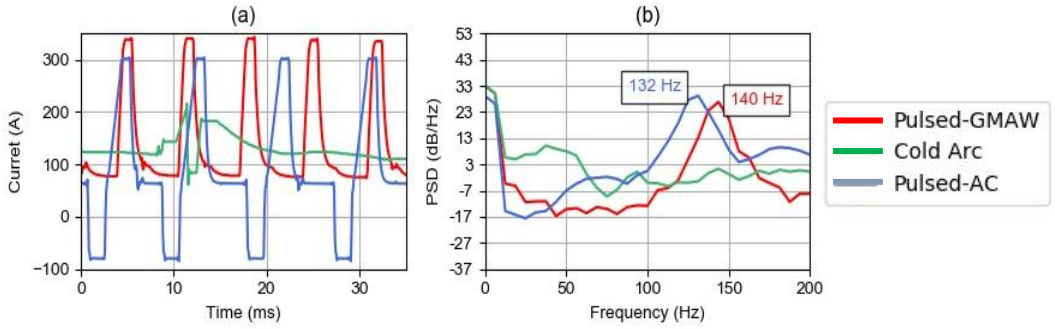


Figura V-3. (a) Señales de intensidad superpuestas de los modos GMAW pulsado, Cold Arc y AC pulsado; (b) Señales de frecuencia superpuestas de los tres modos

3.2 Análisis del tamaño de las gotas transferidas

Como ya se ha mencionado, la razón para utilizar señales pulsadas de intensidad es que en cada pulso se genera y se trasfiere una gota del material fundido del hilo al baño fundido, logrando una transferencia más controlada del material (Figura III-6). Como se puede ver en la Figura V-3 a, la forma de los pulsos de intensidad difiere dependiendo del modo de trabajo, por lo tanto, el volumen de las gotas que son transferidas desde el hilo al baño fundido en cada pulso también es diferente. Este volumen se ha calculado con la Ec. 14 donde WFR es la velocidad de alimentación de hilo, f es la frecuencia de la señal de intensidad y A_w la sección transversal del hilo.

$$Vol.\ de\ gotas\ transferidas = \frac{WFR * A_w}{f}$$

donde,

$$A_w = \pi * (d/2)^2 \quad (14)$$

Los volúmenes de las gotas trasferidas en cada modo se representan en la Tabla V-4. La principal conclusión es que el tamaño de gota más grande se obtiene utilizando el modo Cold Arc. Como se introduce la misma cantidad de material durante el mismo período en cada uno de los tres modos, se trasfieren menos gotas en el modo Cold Arc, aunque las gotas son más grandes en comparación porque los pulsos del modo Cold Arc son menos frecuentes.

3.3 Análisis de los modos de trabajo sinérgicos GMAW para aleaciones de aluminio: batería de cordones únicos

3.3.1 Análisis del suministro térmico *(Heat input, HI)*

El sistema de adquisición de alta frecuencia ha registrado las señales de intensidad y tensión durante la fabricación de la batería de cordones únicos. Estas señales se han integrado para calcular I (A) y V (V), valores de

intensidad y tensión, representados en la Tabla V-4. Se ha utilizado esta metodología debido a que los pulsos de las señales de intensidad y tensión diferían según el modo de trabajo, como se puede apreciar en la sección 3.1.

Tabla V-4. Valores de intensidad, tensión y volúmen de gota transferida calculados para cordones únicos fabricados mediante los tres modos de trabajo con cada nivel de velocidad de alimentación de hilo

	Modo de trabajo								
	GMAW pulsado			**Cold Arc**			**AC pulsado**		
WFR (m/min)	***I* (A)**	***V* (V)**	**V de gota (mm^3)**	***I* (A)**	***V* (V)**	**V de gota (mm^3)**	***I* (A)**	***V* (V)**	**V de gota (mm^3)**
4	65,9	15,3	1,033	67,9	13,5	1,839	70,36	13,7	1,32
8	136,7	18	1,077	136,8	15,3	3,208	128,3	16,6	1,14

Además, el suministro térmico (*Heat Input, HI*) se puede calcular con la Ec. 15:

$$HI = \frac{\eta * \sum_{i=1}^{n} \frac{I_i * V_i}{n}}{TS} \quad (15)$$

donde, I_i (A) y V_i (V) son valores instantáneos de intensidad y tensión; TS es la velocidad de avance; y η es la eficiencia térmica del arco. El valor de la eficiencia térmica del arco se ha definido entre 0,8 y 0,9 en la literatura previa [Cong, 2017] [Su, 2019]. En este caso, se ha fijado en 0,9. Como se puede observar en la Tabla V-4, se han obtenido valores de intensidad y tensión similares con cada nivel de velocidad de alimentación de hilo y cada modo de trabajo para diferentes valores de velocidad de avance y, en consecuencia, diferentes ratios. Esto se debe a que como se explica en el apartado 3.1, habiendo establecido el modo de trabajo, el material, el diámetro del hilo y el gas de protección, la señal de intensidad solo se rige por el valor de la velocidad de alimentación de hilo. En consecuencia, se puede establecer que, con el sistema sinérgico, la intensidad con velocidades de alimentación de hilo de 4 m/min es menor que con 8 m/min.

Además, al aumentar el ratio en los tres modos de trabajo, como se puede ver en la Figura V-4, también se aumenta el suministro térmico por unidad de longitud, porque la velocidad de avance es más lenta. Finalmente, aunque se utilizan los mismos parámetros de fabricación con los tres modos de trabajo, en cada caso se suministra un calor ligeramente diferente. El modo GMAW pulsado tiene el suministro térmico más alto (Figura V-4), porque, como se puede observar en la Figura V-3 a, tiene la intensidad de pico y la frecuencia más altas. El segundo modo es el modo AC pulsado y por último, el modo Cold

Arc con el suministro térmico más bajo, porque su intensidad máxima y la frecuencia de la señal de intensidad son más bajas que en los otros dos modos. Como se discutirá posteriormente, el suministro térmico está estrechamente relacionado con la forma geométrica y la penetración de los cordones obtenidos. Aun así, hay que tener en cuenta que las diferencias entre los suministros térmicos de los tres modos son mínimas y que el tamaño de la gota puede influir en la forma geométrica y la penetración más que otras variables.

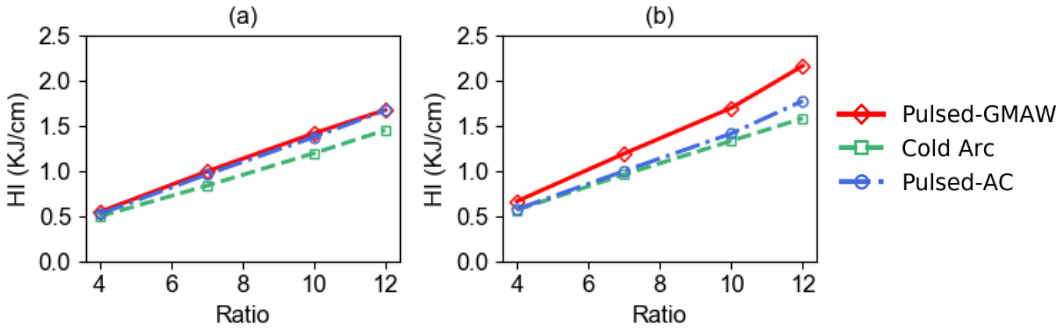


Figura V-4. Valores del suministro térmico (Heat Input, HI) introducidos en la batería de cordones únicos fabricados con los tres modos de trabajo y con velocidades de alimentación de hilo de (a) 4 m/min (casos 1-4) y (b) 8 m/min (casos 5-8) representados en función del ratio

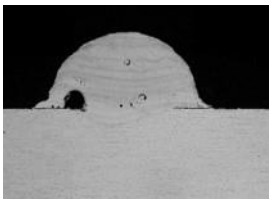
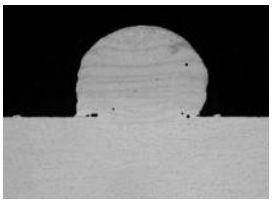
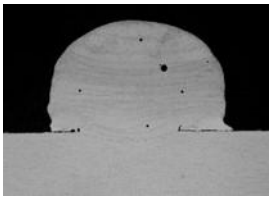
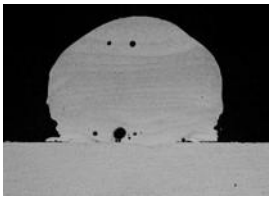
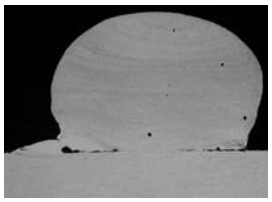
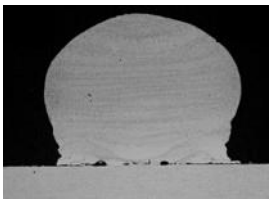
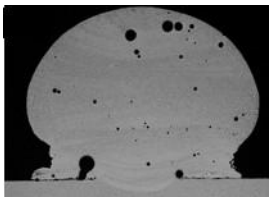
3.3.2 Análisis de las secciones transversales y de las penetraciones

En la Tabla V-5 y Tabla V-6 se presentan las macrografías de las secciones transversales de los cordones fabricadas con velocidades de alimentación de hilo de 4 m/min y de 8 m/min, respectivamente. Como los cordones 1, 2, 3 y 4 del modo Cold Arc y el cordón 4 del modo AC pulsado no son continuas, es decir, no tienen penetración en el sustrato en toda su longitud, no se han sacado macrografías de sus secciones trasversales ya que no se puede obtener información de ellas.

Por un lado, como puede verse en la Tabla V-5, en los tres modos de trabajo con una velocidad de alimentación de hilo de 4 m/min aparece porosidad y la penetración es pequeña o nula. Específicamente, se demuestra que el modo Cold Arc con una velocidad de alimentación de hilo de 4 m/min y ratios de 4-12 (casos 1 a 4) no puede usarse para lograr cordones continuos, es decir, que sean constantes en altura y anchura en toda su longitud. Sin embargo, las penetraciones y los ángulos de mojado (Ec. 4) también son inadecuados en los modos GMAW pulsado y AC pulsado con velocidades de alimentación de hilo de 4 m/min, aunque los cordones son continuos, es decir, que sean constantes en altura y anchura en toda su longitud. De estos resultados se puede concluir que con velocidad de alimentación de hilo de 4 m/min los ratios elegidos de 4-12 (casos 1 a 4) son demasiado bajos para los tres modos de trabajo, pues en

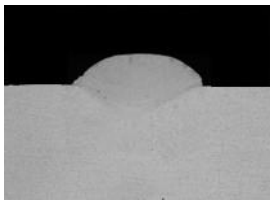
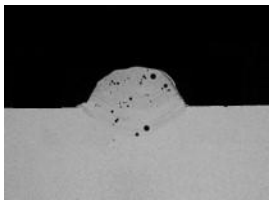
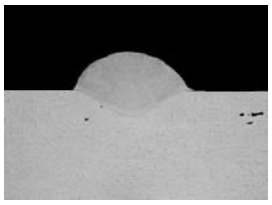
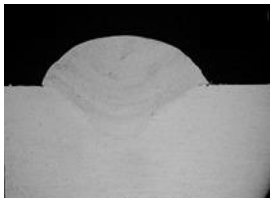
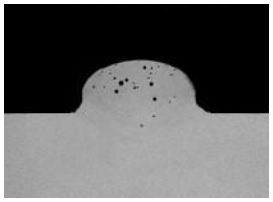
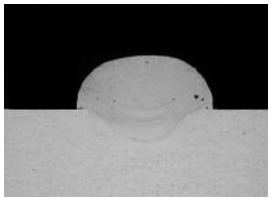
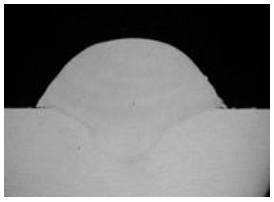
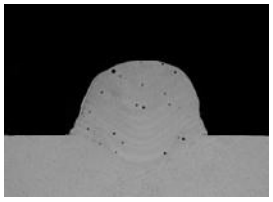
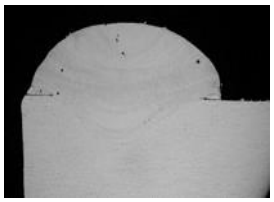
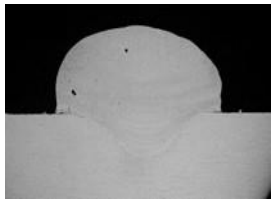
estos casos el suministro térmico (HI) introducido es insuficiente para lograr niveles de penetración aceptables.

Tabla V-5. Secciones transversales de los cordones fabricados con WFR = 4 m/min en los tres modos de trabajo

4 m/min	Modo de trabajo		1,5 mm
N. cordón	**GMAW pulsado**	**Cold Arc**	**AC pulsado**
1		-	
2		-	
3		-	
4		-	-

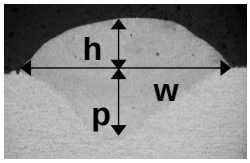
A diferencia de los cordones obtenidos con 4 m/min, a velocidad de alimentación de hilo de 8 m/min, la penetración de los cordones y su ángulo de mojado son adecuados para la fabricación de piezas. Sin embargo, se aprecian altos niveles de porosidad en el modo Cold Arc.

Tabla V-6. Secciones transversales de los cordones fabricados con WFR = 8 m/min en los tres modos de trabajo

8 m/min	**Modo de trabajo**		**3 mm**
N. cordón	**GMAW pulsado**	**Cold Arc**	**AC pulsado**
5			
6			
7			
8			

Después del aporte de cada cordón, estas se han escaneado con el escáner láser. A partir de los datos adquiridos, se han calculado los valores medios de las anchuras y alturas de los cordones a lo largo de los mismos (Tabla V-7). Los valores de penetración de cada cordón también se pueden encontrar en la Tabla V-7. Esta penetración se ha medido a partir de las macrografías de las Tabla V-5 y Tabla V-6. En conclusión, se aprecia claramente que a medida que se disminuye la velocidad de avance, es decir, a medida que aumenta el ratio, la anchura de los cordones también aumenta. En general, esta regla también se mantiene en lo que respecta a la penetración.

Tabla V-7. Anchura, altura y penetración de los cordones fabricados con los tres modos de trabajo

	**Modo de trabajo**								
	GMAW pulsado			**Cold Arc**			**AC pulsado**		
N. cordón	**w (mm)**	**h (mm)**	**p (mm)**	**w (mm)**	**h (mm)**	**p (mm)**	**w (mm)**	**h (mm)**	**p (mm)**
1	3,35	1,99	0,34	2,29	2,07	-	2,98	2,16	0,12
2	3,8	2,38	0,14	2,87	2,55	-	3,54	2,63	0,09
3	4,38	2,86	0,09	3,3	3,16	-	4,06	3,14	0
4	4,4	3,36	0,27	3,96	3,58	-	5,48	3,16	-
5	4,71	1,22	1,19	3,62	1,23	1,06	3,94	1,69	1,08
6	5,53	1,81	1,74	4,38	2,12	1,17	4,98	2,03	1,22
7	6,1	2,31	1,70	4,72	2,84	1,22	5,53	2,47	1,39
8	6,41	2,76	1,45	5,69	3,21	1,39	5,75	2,43	1,45

Como se mencionó anteriormente, el suministro térmico de los diferentes modos de trabajo puede influir en la forma geométrica y la penetración de los cordones aportados. Además, la forma de la señal de intensidad que se introduce en el hilo de soldadura y, posteriormente, el tamaño de las gotas trasferidas también puede determinar la geometría del cordón y la penetración.

En general, el modo GMAW pulsado muestra una penetración más profunda que el modo AC pulsado y el modo Cold Arc, porque los valores de intensidad de pico son más altos. Es decir, cuanto mayor sea la intensidad de pico, mayor es la penetración. Además, los valores de intensidad de pico máximos de la señal de intensidad en el modo GMAW pulsado reflejan una penetración con forma de aguja (forma de “V”). Por el contrario, el modo Cold Arc, debido a su menor intensidad de pico, deja marcas de penetración con una forma más suave (forma de “U”).

Además, como los mayores valores de suministro térmico se obtienen con el modo GMAW pulsado, los cordones aportados son los más anchos y menos altos, como se puede observar en la Tabla V-7. El mismo efecto ha sido reportado por Abe et al. [Abe, 2020], quienes han concluido que si aumenta el suministro térmico, la anchura del cordón también aumenta y la altura disminuye.

Finalmente, como se presenta en la Tabla V-4, el tamaño de las gotas de material transferidas en el modo Cold Arc es mucho mayor y la frecuencia de

aporte de las gotas es menor en comparación con los otros modos de trabajo. Por ello, a lo largo del cordón en el modo Cold Arc se aportan menos gotas. En consecuencia, en el modo Cold Arc, no hay cordones continuos con velocidad de alimentación de hilo de 4 m/min para los ratios establecidos en este estudio, mientras que se encuentran cordones continuos con los mismos parámetros para los modos GMAW pulsado y AC pulsado. Además, esta menor tasa de aporte de gotas en el modo Cold Arc también explica la porosidad obtenida en estos cordones.

3.3.3 Modelos de anchura y altura de los cordones

Tanto la anchura como la altura de los cordones de soldadura con los parámetros elegidos son fundamentales para programar las trayectorias de fabricación. Por un lado, por ejemplo, el ancho de las paredes de las piezas fabricadas determina si la pieza se puede realizar con paredes simples (de un único cordón) o paredes solapadas. Si la anchura no es excesiva, se utilizan paredes simples y se eligen los parámetros de aporte adecuados para aportar cordones con una anchura similar a la pared objetivo. Si la anchura objetivo es superior a la anchura que se puede obtener con un único cordón se deben de solapar varios cordones. Asimismo, la distancia de solape se establece dependiendo de esta anchura de cordón, lo que subraya la importancia de los modelos predictivos de la anchura con combinaciones específicas de parámetros de aporte. De esta manera, empleando los datos reportados en la Tabla V-7, se han construido los modelos que representan las relaciones entre la anchura del cordón y los parámetros de aporte siguiendo las Ec. 16, 17 y 18 para los modos de trabajo GMAW pulsado, Cold Arc y AC pulsado, respectivamente.

$$w_{GMAW\ pulsado} = 0{,}9538 * WFR - 0{,}0129 * TS \quad (16)$$

$$w_{Cold\ Arc} = 0{,}8259 * WFR - 0{,}0146 * TS \quad (17)$$

$$w_{AC\ pulsado} = 0{,}9430 * WFR - 0{,}0165 * TS \quad (18)$$

Por otro lado, la altura de los cordones obtenidos con los parámetros de aporte elegidos establece el crecimiento por capa para la programación de las piezas y, por lo tanto, también determina el número de capas necesarias. En consecuencia, los modelos de altura del cordón siguiendo las Ec. 19, 20 y 21 se han formulado para los modos de trabajo GMAW pulsado, Cold Arc y AC pulsado, respectivamente.

$$h_{GMAW\ pulsado} = 0{,}5063 * WFR - 0{,}0119 * TS \quad (19)$$

$$h_{Cold\ Arc} = 0{,}5983 * WFR - 0{,}0154 * TS \quad (20)$$

$$h_{AC\ pulsado} = 0{,}4648 * WFR - 0{,}0077 * TS \quad (21)$$

3.4 Análisis de los modos de trabajo sinérgicos GMAW para aleaciones de aluminio: Paredes simples

Como ya se ha mencionado, se fabrica una pared delgada de un solo cordón con los parámetros del cordón número 8 con cada modo de trabajo. Estos parámetros se han elegido porque se maximiza la tasa de aporte, con la máxima WFS posible dentro de los límites de los tres modos de trabajo (8 m/min), obteniendo penetraciones aceptables y continuidad del cordón (ver Tabla V-6 y Tabla V-7, cordón 8). En el modo GMAW pulsado, han sido necesarias 36 capas para lograr la altura de pared deseada de 50 mm. En el modo Cold Arc, han sido necesarias 30 capas y en el modo AC pulsado, 33. Como los cordones de soldadura de una sola capa tienen diferentes formas según el modo de trabajo, la apariencia geométrica de las tres paredes también difiere, como se puede ver en la siguiente sección.

3.4.1 Forma geométrica de los cordones aportados

Para la medición de la forma geométrica se ha utilizado un proceso de tratamiento de imágenes que analiza la forma geométrica y cuantifica la ondulación de las tres paredes. En este proceso, se han tomado macrografías transversales de las paredes y se han convertido a escala de grises (Figura V-5). Luego, se ha utilizado un filtro gaussiano para marcar los bordes de las paredes, como se muestra en la Figura V-5 a.1 (en rojo). Tenga en cuenta que en la Figura V-5 a.1, se muestra la representación de los ejes utilizados en este estudio, el punto 0 del eje Z aparece en la parte superior de la pared.

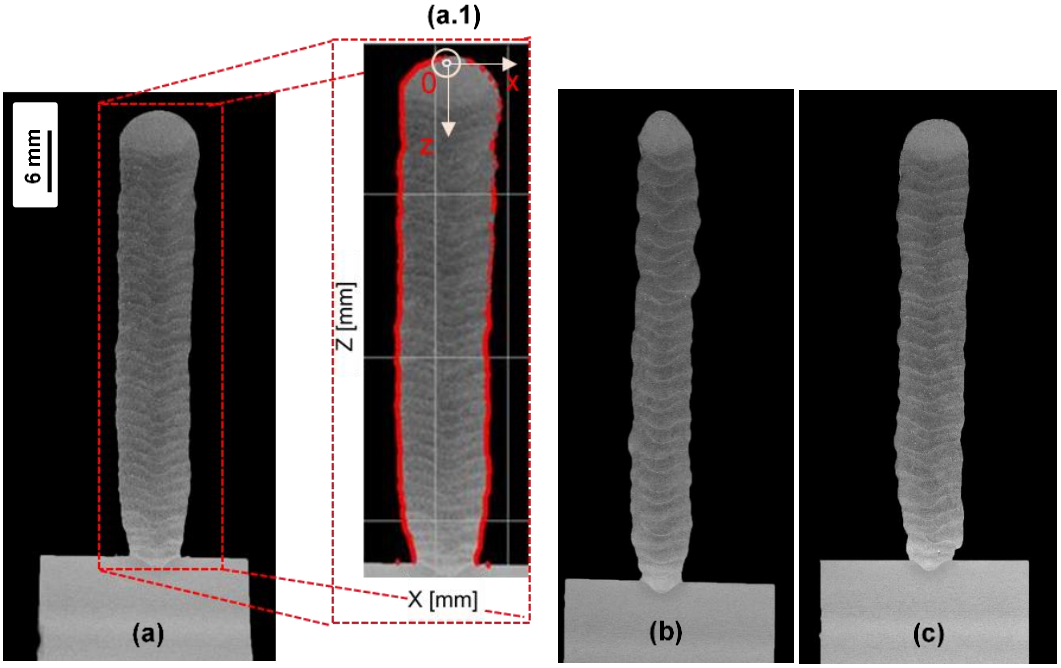


Figura V-5. Macrografías de las paredes (a) GMAW pulsado, (b) Cold Arc y (c) AC pulsado. (a.1) Macrografía tratada para determinar los bordes de las paredes

En la Figura V-6, los bordes se han dibujado definiendo la forma geométrica de las tres paredes. Al procesar los datos, se han podido calcular la anchura media de las paredes o, lo que es lo mismo, el WW (*Wall Width*) y la ondulación de la superficie a lo largo de la altura de la pared (Z). Como se puede ver en la parte derecha de la Figura V-6, las primeras capas de las tres paredes son más estrechas, porque el sustrato está frío al principio. Con el modo GMAW pulsado se fabrica la pared más ancha con un WW de 9,31 mm; la pared fabricada con el modo AC pulsado es más estrecha con un WW de 8,57 mm y la pared Cold Arc es la más estrecha con un WW de 7,48 mm. Este resultado concuerda con la cantidad de capas que son necesarias en cada pared para alcanzar la altura deseada. En otras palabras, se han necesitado 36 capas en la pared GMAW pulsado, porque cada capa es más ancha y baja. En cambio, en la pared Cold Arc se han aportado solo 30 capas, debido a que el crecimiento por capa es mayor.

Esta observación debe tener en cuenta que los valores de tasa de aporte y velocidad de avance han sido iguales en las tres paredes, pero la energía introducido no ha sido la misma debido a los diferentes modos de trabajo utilizados. Como se ha demostrado en el apartado 3.3.1, dependiendo del modo de trabajo, el suministro térmico es diferente, logrando cordones más anchos y bajos al tiempo que aumenta el suministro de calor. Además, la forma geométrica de las paredes también coincide tanto con los modelos de anchura

y altura determinados en el apartado 3.3.3 como con los datos representados en la Tabla V-7.

Finalmente, se puede apreciar que la ondulación de la superficie en las paredes GMAW pulsado y AC pulsado es menor que la ondulación de la pared Cold Arc. En el modo Cold Arc, las marcas de penetración son más suaves debido a su menor intensidad de pico y las últimas capas están ligeramente desplazadas hacia un lado de la pared. Por eso, la ondulación de la superficie es mayor. En contraste, en los modos GMAW pulsado y AC pulsado, las líneas de fusión que aparecieron entre las capas tienen forma de "V" (esto concuerda con las marcas de penetración obtenidas en la Tabla V-6 cordón 8) logrando penetraciones más profundas debido a que los valores de la intensidad de pico son más altos.

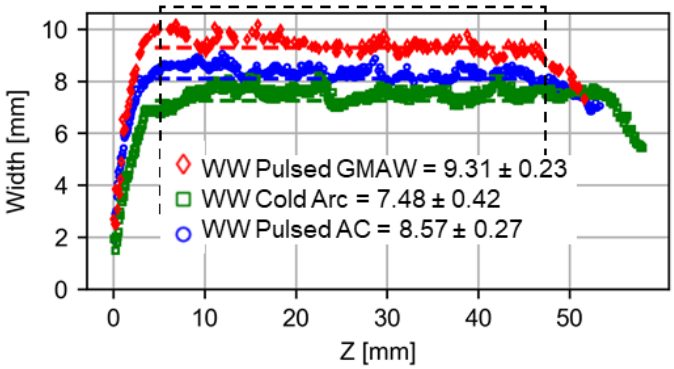


Figura V-6. Representación de la anchura de la pared (WW) a lo largo de la altura (eje Z), siendo el valor del eje Z nulo en la parte superior de las paredes. También aparecen los valores de la WW y la ondulación superficial calculadas

Finalmente, en cuanto al área efectiva de las paredes, el área del modo GMAW pulsado es de 475 mm^2, el área del modo Cold Arc es de 382 mm^2 y el área del modo AC pulsado es de 440 mm^2. El área efectiva es el área obtenida después del mecanizado de las paredes. Como era de esperar, se ha obtenido la mayor área efectiva con el modo GMAW pulsado.

3.4.2 Microestructura

En la Figura V-7, se pueden ver las microestructuras dentro de las secciones centrales en la zona media de las paredes GMAW pulsado, Cold Arc y AC pulsado (Figura V-7 a, Figura V-7 b y Figura V-7 c, respectivamente). Se obtienen microestructuras similares en los tres casos, aunque se pueden apreciar algunos poros. Este problema, discutido en la sección 3.4.3, es de vital importancia en la fabricación de piezas de aluminio utilizando tecnologías de fabricación aditiva [Gu, 2019]. Otro problema que puede aparecer en las piezas aportadas en aleaciones de aluminio es el agrietamiento en caliente, causado

por la presencia de fases dentro de los límites de grano que son difíciles de fundir y no pueden soportar los valores de tensión residual de cada ciclo térmico, como han reportado tanto Horgar et al. para Al 5183 [Horgar, 2018], como Su et al. para Al 5356 [Su, 2019]. En este estudio, no se aprecian grietas en las paredes fabricadas con los parámetros de aporte elegidos en los tres modos de trabajo.

En cuanto a la microestructura, el calor se disipa en las primeras capas a través de las paredes a lo largo del sustrato. El crecimiento de los granos es generalmente en la misma dirección que la disipación de calor. En consecuencia, se crean granos columnares en las primeras capas a lo largo de esta dirección, como también han informado Cong et al. [Cong, 2015]. Pero a medida que aumenta la altura de la pared aportada, el sustrato está a una distancia y, por lo tanto, se reduce cualquier disipación de calor a través de este. Después, gracias al aporte continuo de capas donde el aporte de la siguiente capa calienta la anterior, las paredes alcanzan un equilibrio térmico que genera un crecimiento de grano similar en todas las direcciones, logrando una estructura de grano equiaxial. Sin embargo, se puede observar una estructura de grano columnar cerca de cada límite de capa con los tres modos de trabajo como se puede ver en los mapas EBSD de la Figura V-7. Simplificando, en la parte media de las paredes fabricadas utilizando GMAW pulsado, Cold Arc y AC pulsado se intercalan estructuras de granos equiaxiales y columnares, teniendo áreas con estructura de grano columnar cerca de los límites de capa como lo han demostrado Li et al. [Li, 2020-b] y Su et al. [Su, 2019]. Estos autores reportaron que, al aportar una nueva capa, la pieza se enfría ligeramente desde el último aporte realizado. Gracias a este enfriamiento, se genera un mayor gradiente térmico en el límite entre capas y se crea una pequeña área de granos columnares con un crecimiento de grano en la dirección de este gradiente. Por otro lado, en el resto del material que no está cerca de los límites de capa, no aparece este gradiente térmico y la estructura de grano es equiaxial.

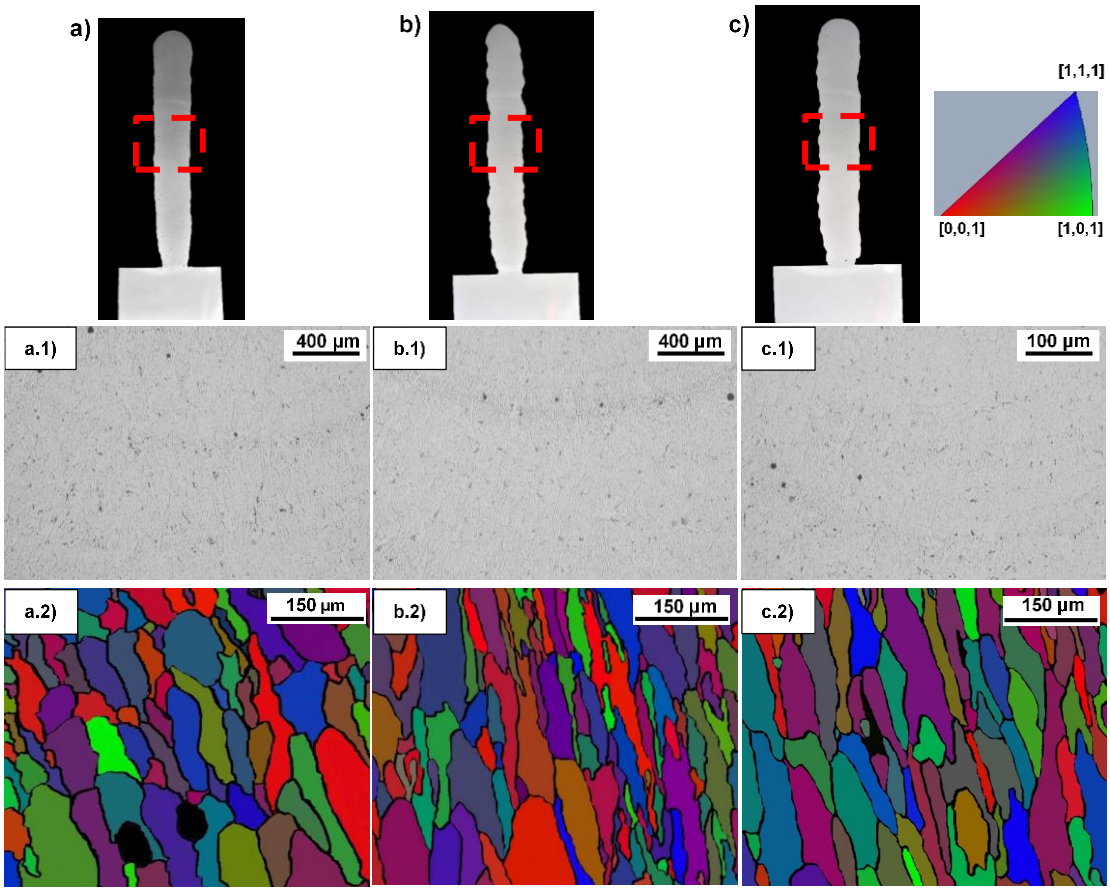


Figura V-7. Microestructura de la zona central de las paredes fabricadas mediante los modos: (a) GMAW pulsado, (b) Cold Arc y (c) AC pulsado. 1) Microestructura observada mediante microscopio óptico; 2) Mapas EBSD

No obstante, se pueden apreciar diferencias en la distribución del tamaño de grano al comparar los tres modos de trabajo. En la Figura V-8 se presentan las distribuciones granulométricas de los mapas EBSD tomados en la zona central de las tres paredes fabricadas con los modos de trabajo GMAW pulsado, Cold Arc y AC pulsado. Como se puede ver, el modo AC pulsado tiene el valor de tamaño de grano medio más alto de 2316 μm^2. En contraste, los valores de tamaño de grano medio de la pared del modo GMAW pulsado y la pared del modo Cold Arc son, respectivamente, 17,919% y 54,871% inferiores en comparación con la pared AC pulsado. En otras palabras, como se ve en la Figura V-8, en el modo GMAW pulsado, el 66,31% de los granos ocuparon un área menor a 2000 μm^2, el 88,23% en el modo Cold Arc y el 52,84% en el modo AC pulsado. El tamaño de grano medio más pequeño obtenido en el modo Cold Arc se debe a la naturaleza del proceso Cold Arc con una frecuencia de transferencia de gotas más baja que los otros dos modos de trabajo. Esta frecuencia más lenta crea un proceso más frío logrando un menor

suministro de calor, por lo que el gradiente térmico se reduce y en consecuencia el tamaño de grano es más pequeño.

El mayor tamaño de grano obtenido con el modo AC pulsado se debe a que cuando la señal de intensidad es negativa, los electrones viajan en la otra dirección y por lo tanto, el material aportado previamente se calienta creando un tamaño de grano mayor. Este efecto no se aprecia en el modo GMAW pulsado porque en este modo toda la señal de corriente es positiva.

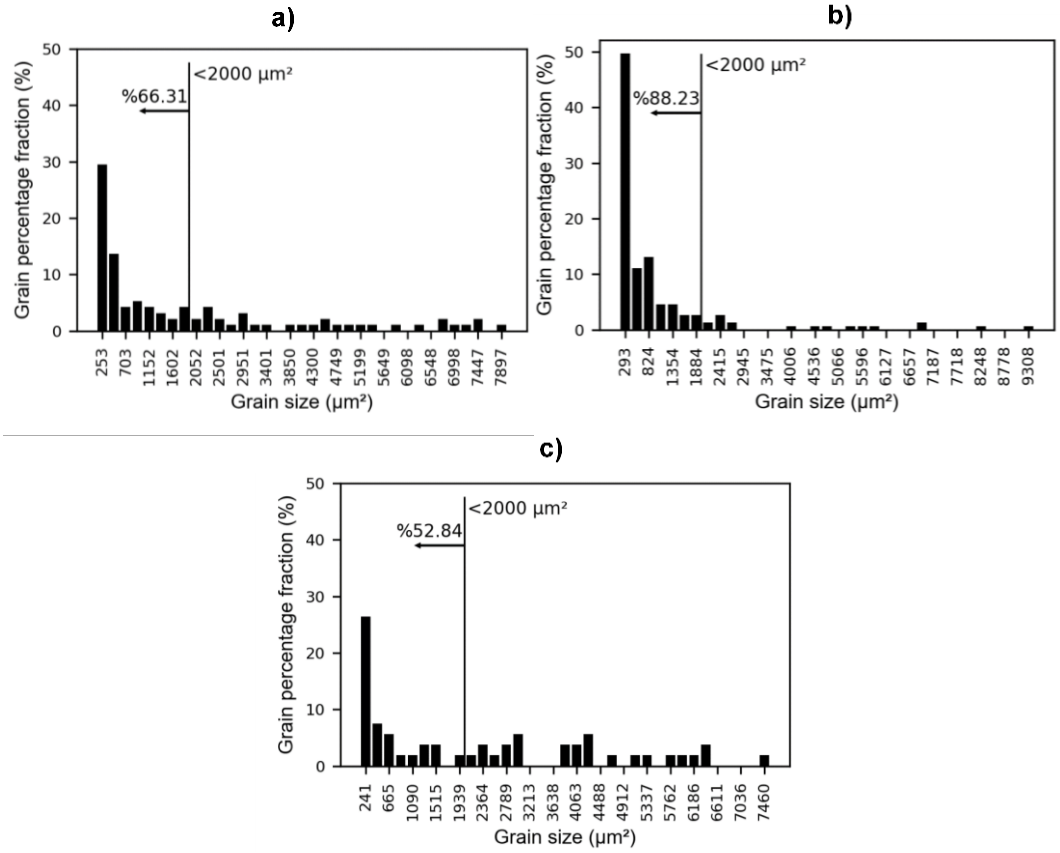


Figura V-8. Distribución del tamaño de grano de los mapas EBSD de las secciones transversales centrales de las tres paredes: (a) GMAW pulsado, (b) Cold Arc y (c) AC pulsado

3.4.3 Análisis de la porosidad

El análisis del nivel de porosidad es una cuestión clave en la fabricación aditiva de aleaciones de aluminio [Haselhuhn, 2016]. La porosidad en el aluminio aportado mediante la tecnología WAAM y la soldadura tradicional, se debe principalmente a la presencia de hidrógeno en el proceso. En vista de la diferencia entre los límites de solubilidad del hidrógeno para el aluminio en estado sólido y líquido, algo de hidrógeno puede quedar atrapado durante el proceso de solidificación creando porosidad. El hidrógeno se introduce en el proceso debido a las impurezas y la humedad que a menudo se pueden encontrar en la superficie del hilo de alimentación [Panchenko, 2020]. Además,

la porosidad también puede depender de la limpieza y del pulido del sustrato, el ángulo de inclinación de la antorcha y la pureza del gas protector.

Dado que el objetivo principal de este estudio ha sido comparar los modos de trabajo GMAW pulsado, Cold Arc y AC pulsado, también se ha realizado un análisis de porosidad de cada modo. La Figura V-9 muestra algunas de las micrografías sin ataque en las que se han medido los niveles de porosidad.

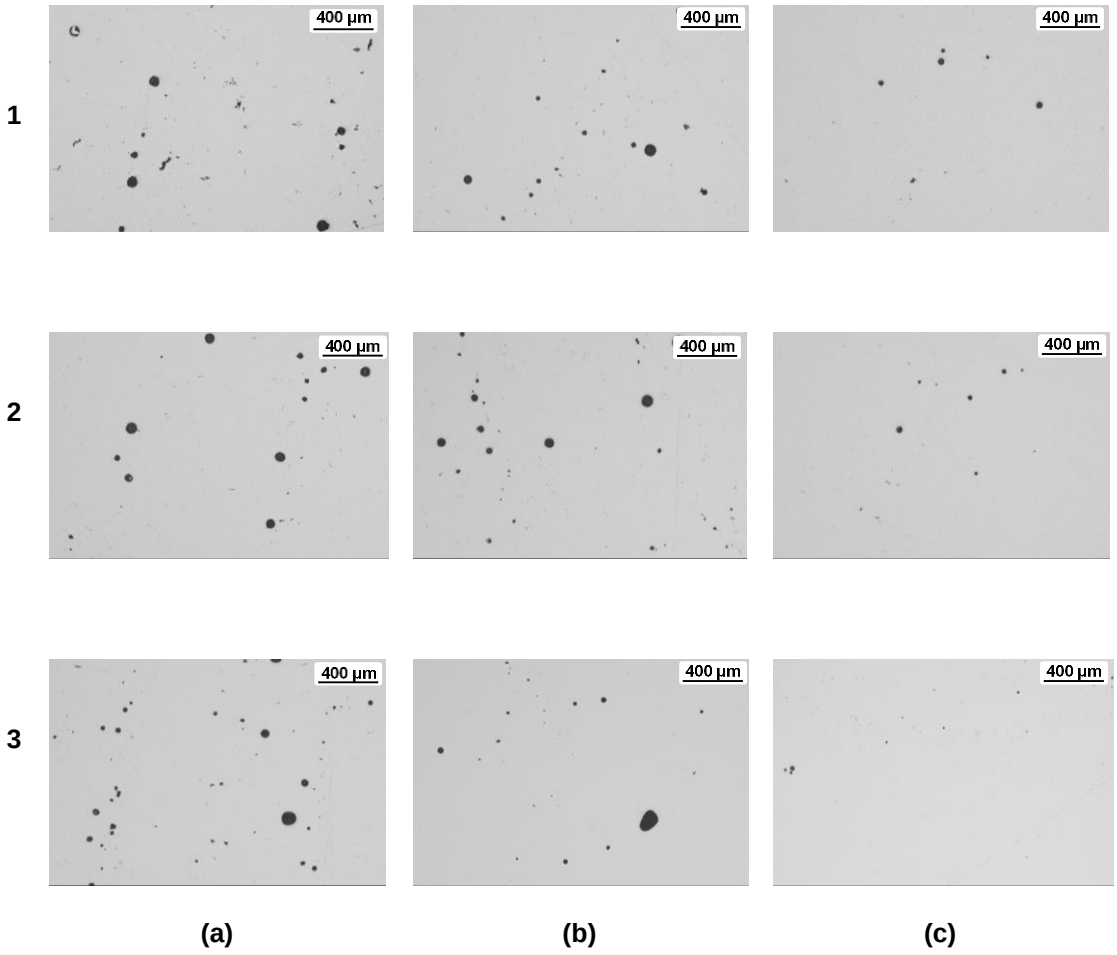


Figura V-9. Micrografías no atacadas para el análisis de la porosidad: (a) pared GMAW pulsado, (b) pared Cold Arc y (c) pared AC pulsado. (1) Zona superior de las paredes; (2) Zona media de las paredes; (3) Zona inferior de las paredes

Como puede verse en la Figura V-9 y la Figura V-10, el modo de AC pulsado reduce sustancialmente la porosidad del material. Los valores medios de porosidad de las paredes fabricadas con los modos de trabajo GMAW pulsado, Cold Arc y AC pulsado son 1,1%, 0,66% y 0,13%, respectivamente.

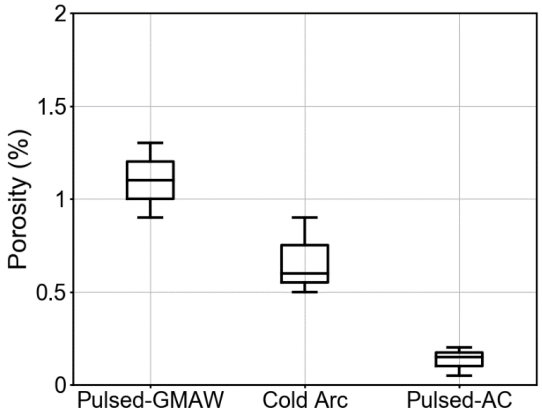


Figura V-10. Valores de porosidad media obtenidas con los modos de trabajo GMAW pulsado, Cold Arc y AC pulsado

Está claro que el modo AC pulsado con altas tasas de aporte de polaridad variable reduce los niveles de porosidad del material aportado, un factor clave para la integridad y la calidad del material. La razón de la reducción de la porosidad en el material aportado con este modo es la polaridad variable que tiene. Cuando la señal de intensidad es positiva, como en los otros modos de trabajo, la dirección del movimiento de los electrones calienta el hilo, es decir, el electrodo, y lo funde para aportar material en el sustrato. En cambio, cuando la señal de intensidad es negativa, la polaridad cambia y la corriente calienta los cordones previamente aportados, eliminando la película de óxido de magnesio superficial natural que se crea en las superficies de las aleaciones de aluminio aportadas. Esta eliminación hace posible que el material evacúe el hidrógeno atrapado en el interior del material fundido, reduciendo el nivel de porosidad obtenido. En resumen, en el modo AC pulsado, cuando la señal de intensidad es negativa, se calienta el material previamente aportado eliminando la película de óxido creada en la superficie y de esta forma sale el gas de hidrógeno atrapado en el material y consecuentemente se reduce la porosidad.

3.5 Análisis de la microestructura y de las propiedades mecánicas: Pared solapada

3.5.1 Microestructura

En la pared solapada no se pueden observar defectos de fabricación, faltas de llenado, grietas o poros a nivel macroscópico. En cuanto a la microestructura obtenida, como se observa en la Figura V-11 dejando aparte la zona de unión con el sustrato, en la pared solapada entera en los tres planos (XY, XZ e YZ) se obtiene una microestructura de granos equiaxiales. Además, también se han observado poros microscópicos de dimensiones inferiores a 100 µm.

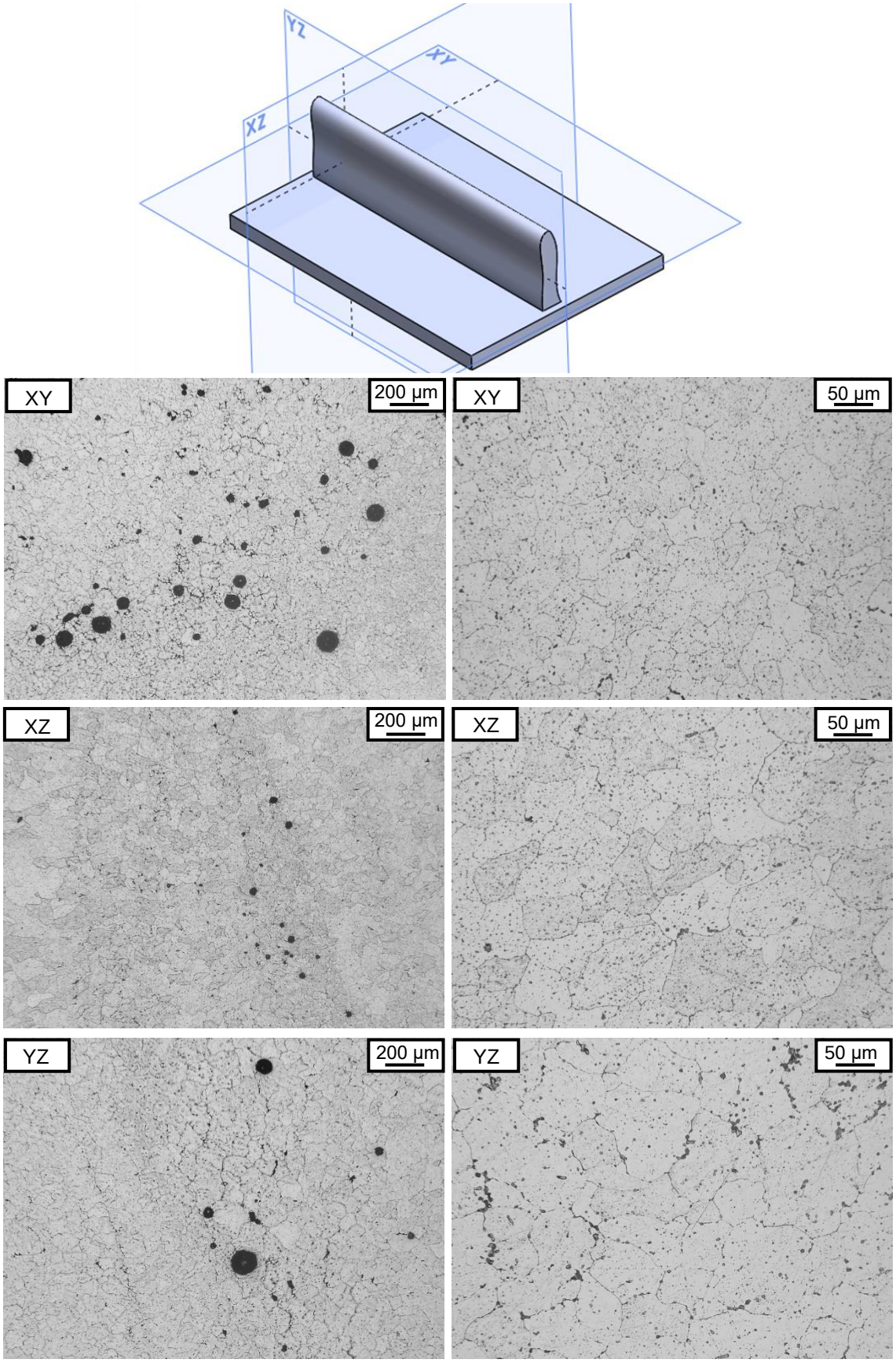


Figura V-11. Microestructura de la pared solapada en diferentes planos XZ, YZ y XY a diferentes aumentos (x50, x200)

3.5.2 Durezas

También, se ha medido la dureza en las diferentes zonas de la pared fabricada, para apreciar su evolución. En cada zona se han hecho tres medidas a lo largo del ancho de la pared y los valores medios se pueden observar en la Tabla V-8. Como se ve las durezas son parecidas en la parte superior y en la parte media porque la microestructura obtenida es similar con granos equiaxiales (Figura V-11). En cambio, en la parte inferior, como es la zona que está cerca de la interfase con el sustrato, la microestructura se vuelve columnar y los valores de dureza aumentan ligeramente.

Tabla V-8. Resultados de los valores de dureza de la pared solapada

	Durezas (HV)
Parte superior	154,67
Parte media	151,67
Parte inferior	163,3

3.5.3 Propiedades mecánicas

Por último, se han estudiado las propiedades mecánicas de dicha pared. Para ello, se han extraído probetas para el ensayo de tracción y para el ensayo de resiliencia de acuerdo con la distribución de probetas de la Figura V-1. Los valores obtenidos (Tabla V-9) son similares a los valores de las paredes fabricadas mediante WAAM basado en GMAW en aluminio 5356 en literatura previa reportados en el capítulo II apartado 5.2 y a los predefinidos por el proveedor del hilo como material de referencia.

Tabla V-9. Valores obtenidos del ensayo de tracción y ensayo de resiliencia de la pared solapada de aluminio 5356

		Ensayo de tracción			**Ensayo Charpy**
		UTS (MPa)	**YS 0,2% (MPa)**	**Elong. (%)**	**Tenacidad a la fractura (J)**
Pared solapada	Horizontal	277 ± 3	111 ± 6	33 ± 1	24 ± 1
	Vertical	264 ± 1	106 ± 3	27 ± 3	18 ± 3
Material de referencia	-	300	145	-	-

3.6 Validación

Para la validación del desarrollo llevado a cabo en aluminio 5356 se han fabricado dos demostradores. Por un lado, se ha fabricado un molde para la manufactura de componentes de fibra de carbono para aeronáutica y, por otro lado, se ha fabricado una pieza de amarre optimizado topológicamente, con el cual, se puede obtener un gran ahorro de material.

3.6.1 Molde para la fabricación de componentes de fibra de carbono

En primer lugar, se ha fabricado un molde en aluminio 5356 mediante la tecnología WAAM basado en GMAW. Este molde va a ser utilizado para la fabricación de piezas en fibra de carbono con la geometría que se aprecia en la Figura V-12.

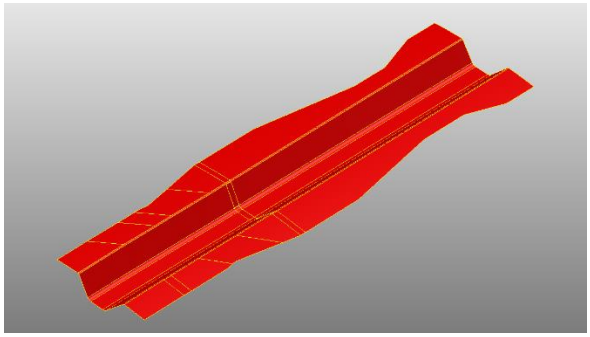


Figura V-12. Diseño de la pieza a fabricar en fibra de carbono mediante el molde de aluminio

Estas son las condiciones que tiene que cumplir dicho molde:

1- La superficie en contacto con la fibra (superficie superior) del molde tiene que estar mecanizada para conseguir un acabado superficial de Ra 1,6 o 3,2.
2- La superficie de apoyo del molde debe de estar planificado; no tiene por qué ser toda la superficie, podrían ser cuatro tacos o patas soldadas y planificadas.
3- El molde necesita un aliviado térmico antes del mecanizado final.
4- Tolerancias dimensionales del molde de ±0,25 mm en la superficie superior.
5- El molde debe ser estanco, al menos en la cara superior.

A partir del diseño de la pieza que se va a fabricar mediante el molde (Figura V-12) se ha creado el diseño del mismo (Figura V-13). Por razones de ahorro del material se ha decidido no fabricar un molde macizo y se le han añadido dos nervios rigidizadores centrales. Además, se han puesto dos patas inferiores de apoyo para no tener que planificar toda la parte inferior y reducir el tiempo de mecanizado.

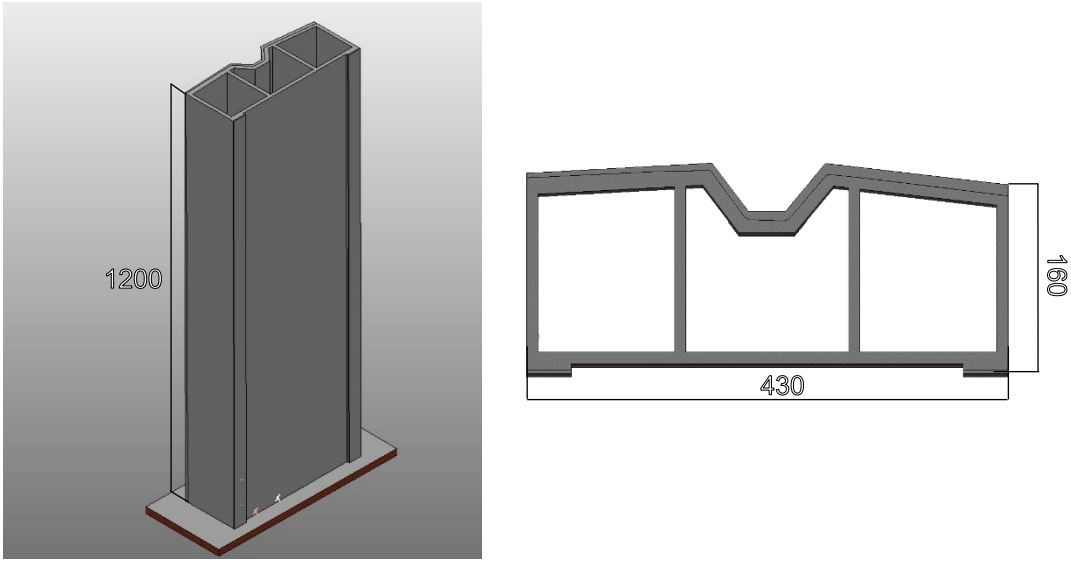


Figura V-13. Diseño del molde, cotas en mm

En la Figura V-14 se observan las trayectorias y la secuencia de aporte llevadas a cabo durante la fabricación mediante WAAM. Para minimizar los tiempos de enfriamiento, se ha diseñado la secuencia de aporte de manera que deja el máximo tiempo posible en volver al mismo punto de aporte. De esta manera, en primer lugar, se ha aportado el contorno de la pieza. Este contorno se ha separado en tres partes que tienen sus propios parámetros de aporte (partes 1.1, 1.2 y 1.3), siendo el aporte continuo. En segundo lugar, se ha aportado el apoyo derecho (parte 2) y luego el solape (parte 3). Después, se ha aportado el apoyo izquierdo (parte 4) y, por último, los dos nervios centrales, las partes 5 y 6. En la segunda capa se ha recorrido la misma trayectoria, pero en dirección opuesta para mantener la simetría de la pieza. Finalmente, se ha repetido la secuencia de estas dos capas hasta alcanzar la altura establecida (1200 mm), siendo necesarias 800 capas.

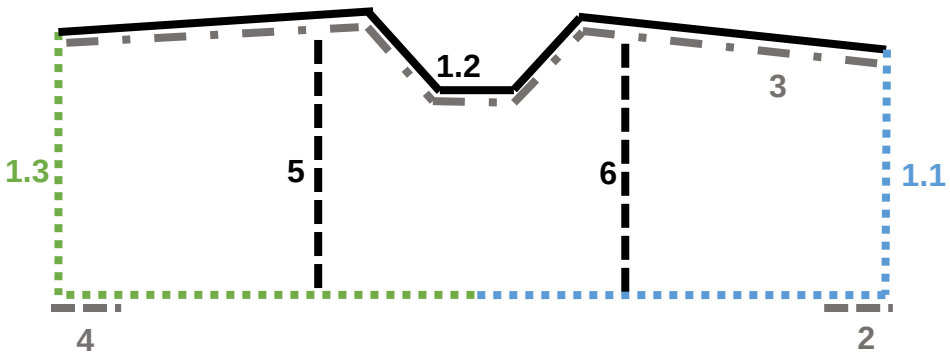


Figura V-14. Trayectorias y secuencia de aporte del molde

De esta manera, este molde se ha fabricado con cordones únicos que se solapan tanto en las partes 2 y 4 como en la parte 3 (Figura V-14). El solape entre los cordones ha sido del 65% de la anchura del cordón (8 mm). Al fabricar

el molde se ha esperado un periodo de tiempo entre capas consecutivas para no tener un suministro térmico excesivo en la pieza. En relación, como se ha especificado antes, se ha intentado minimizar el tiempo de espera entre capas ajustando la secuencia de aporte. De esta manera, antes de aportar una nueva capa se ha mirado la temperatura en la superficie de inicio mediante el pirómetro instalado de manera especificada en el capítulo III y no se ha empezado el aporte hasta estar por debajo de 270ºC. En la práctica se ha visto que los tiempos de espera han sido nulos por estar en todo momento por debajo de esta temperatura en el punto de inicio.

Como sustrato se ha usado una placa plana de aluminio 5083 de 550 x 250 x 30 mm. Además, para este aporte se ha elegido el modo de trabajo GMAW (Job 76) pulsado. Esta elección se ha debido a que, ya que las dimensiones de la pieza son considerables, se ha buscado una tasa de aporte lo más alta posible con una integridad metalúrgica del material adecuado. De esta manera, de los tres Jobs adecuados para el aluminio 5356 estudiados previamente (GMAW pulsado, Cold Arc y AC pulsado), se ha elegido el modo GMAW pulsado ya que es el método que ofrece la mayor tasa de aporte con una porosidad controlada. Si mantener bajo el nivel de porosidad en esta pieza fuera un aspecto de vital importancia se habría elegido el modo AC pulsado, aunque penalice un poco el valor máximo de tasa de aporte.

La altura establecida de capa ha sido de 1,5 mm, es decir, después de aportar una capa el robot se ha subido en el eje Z 1,5 mm antes de aportar la siguiente. Este valor se ha determinado gracias a la experimentación previa llevada a cabo. Además, dado que se han querido conseguir tasas de aporte (DR) lo más altas posibles con un ángulo de mojado adecuado (alrededor de 30º), con una anchura de cordón determinada y un solape bueno, pero sin tener un suministro térmico excesivo y con una integridad metalúrgica adecuada, se ha elegido el conjunto de parámetros que se aprecia en la Tabla V-10. En las pruebas previas se ha visto que como tenemos cordones solapados en alguna de las caras, el crecimiento de todas las partes de la pieza no es uniforme. Por ello, se ha decidido poner diferentes velocidades de alimentación de hilo para cada parte y velocidad de avance común de 800 mm/min.

Tabla V-10. Parámetros de fabricación del molde de aluminio 5356

N. parte	WFR (m/min)	DR (kg/h)	TS (mm/min)
1.1	13	2,35	800
1.2	12	2,17	800
1.3	13	2,35	800
2	10	1,81	800
3	10	1,81	800
4	10	1,81	800
5	13	2,35	800
6	13	2,35	800

Una vez fabricado el molde (Figura V-15), en primer lugar, se ha aliviado térmicamente. Después, se ha mecanizado la superficie funcional, la cara superior (parte 1.2), para conseguir un acabado superficial entre Ra 1,6-3,2 cómo se requería y además, se ha medido esta superficie para determinar si cumpliría la exactitud geométrica necesaria obteniendo un resultado positivo. Seguidamente, se han planificado los apoyos (partes 2 y 4) y por último, se le ha realizado una prueba de estanqueidad a la superficie superior que ha pasado adecuadamente.

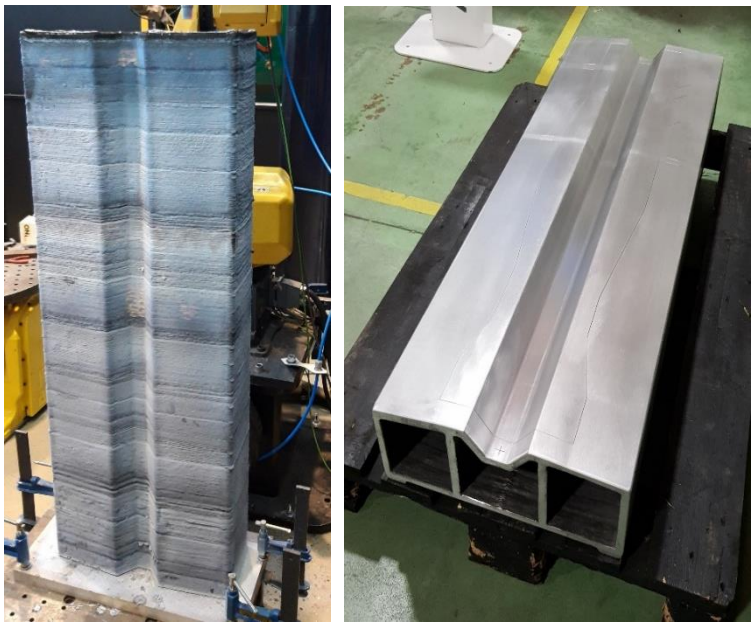


Figura V-15. (izq.) Molde de aluminio tal y como se obtiene de la fabricación mediante WAAM y (dcha.) tras el mecanizado final

Con este demostrador, se ha demostrado que el proceso WAAM basado en GMAW tiene un gran potencial para fabricar piezas de aluminio de un tamaño

considerable de una manera competitiva. Por un lado, los tiempos de fabricación son optimizados mediante el proceso WAAM en comparación con los procesos de mecanizado. Por otro lado, se puede ahorrar material con el proceso WAAM ya que se obtiene una preforma cercana a la geometría final comparando con procesos de mecanizado desde bloque.

Además, en esta pieza, como en la pieza con álabes fabricada como demostrador en el capítulo IV en acero, se ve que, dependiendo de la geometría y estrategia de aporte, todas las partes de una misma capa no crecen de igual manera. Por ejemplo, las zonas que tienen solape crecen más que las zonas de un único cordón. En este caso, ese problema se ha solventado ajustando los parámetros de fabricación (parámetros de aporte) para cada parte de la capa como se ve en la Tabla V-10. Esta es una solución mejor que la planteada en el capítulo IV para la pieza con álabes donde se añaden capas a algunas zonas de la pieza para conseguir un crecimiento homogéneo. Esto se debe a que, para añadir capas en zonas concretas, se tienen que diseñar y postprocesar las trayectorias de las mismas y además el operario tiene que estar en todo momento atento para saber cuándo es necesario añadirlos, lo que hace que el proceso sea mucho más laborioso. Por todo ello, se concluye que siempre se ajustarán los parámetros de proceso si se tienen diferentes tipos de aporte en una misma capa para obtener un crecimiento homogéneo.

3.6.2 Torretas de aluminio

El proceso llevado a cabo desde el diseño original a la fabricación final de las torretas de aluminio 5356 se puede observar en la Figura V-16. Primero, partiendo del diseño original de la torreta, se ha optimizado topológicamente sin tener en cuenta las restricciones del proceso WAAM. Posteriormente, con la caracterización del material (aluminio 5356 fabricado mediante WAAM) llevada a cabo en secciones anteriores de este capítulo se han determinado las características geométricas y las propiedades mecánicas obtenidas. Seguidamente, con esta información se han hecho dos rediseños optimizados topológicamente de la torreta teniendo en cuenta las restricciones del proceso WAAM. Luego, se han generado las trayectorias de aporte mediante el software PowerMill (Autodesk, Estados Unidos) y finalmente se ha fabricado las torretas mediante el sistema robótico diseñado en esta tesis.

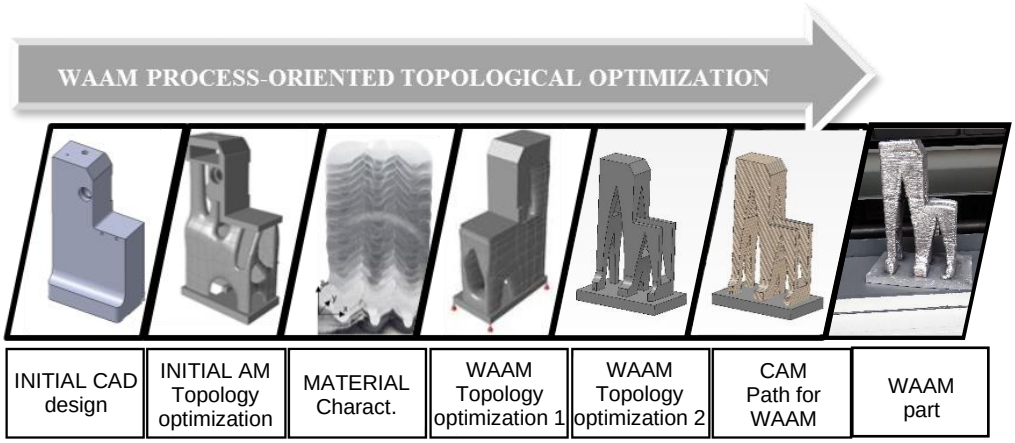
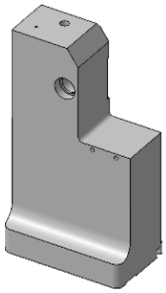
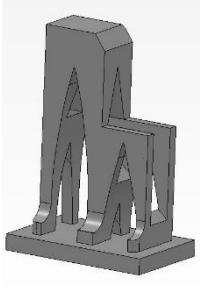


Figura V-16. Proceso de diseño y fabricación de las torretas

Como se ha mencionado previamente, en primer lugar, desde el diseño original mediante optimización topológica se ha optimizado el diseño de la torreta sin tener en cuenta las restricciones del proceso WAAM. La fabricación de este diseño no es posible mediante este proceso. En segundo lugar, una vez que se han introducido las restricciones del proceso WAAM y las propiedades geométricas y mecánicas obtenidas en esta aleación de aluminio se han llevado a cabo dos rediseños también mediante optimización topológica. En la Tabla V-11 se muestra la comparación de los pesos del diseño original con los diseños aligerados. En el diseño topológicamente optimizado para AM, la reducción de peso es del 61%. En cambio, en el primer rediseño adaptado a WAAM se consigue una reducción del peso del 31%, con respecto al diseño original. Por último, en el segundo rediseño adaptado a WAAM la reducción de peso es de 62,8%. Por ello, a causa de los mayores ahorros de material conseguidos se ha elegido este último rediseño para fabricarlo.

Tabla V-11 Comparación de los pesos del diseño original, el rediseño optimizado topológicamente para AM y los rediseños optimizados topológicamente para WAAM

	Diseño original	**Diseño optimizado top. para AM**	**Diseño optimizado top. para WAAM 1**	**Diseño optimizado top. para WAAM 2**
Diseño				
Peso	6 kg	2,3 kg (↓61%)	4,1 kg (↓31%)	2,23 kg (↓62,8%)

Una vez definido que se fabricará el segundo rediseño de la torreta en Al 5356, se ha decidido fabricar un demostrador de una única torreta y un demostrador matricial compuesto por cuatro torretas con este mismo diseño. Como sustrato se han usado placas planas de aluminio 5083 de 15 mm. Por otro lado, se ha decido fabricar las piezas capa a capa, de manera no continua. Es decir, se han hecho paradas entre las diferentes capas, esperando a una temperatura de referencia controlada mediante el pirómetro instalado en el sistema robótico diseñado en el capítulo III. Aun así, a causa de la gran habilidad de disipación de calor del aluminio, en este caso, no han sido necesarios estos tiempos de espera.

En la fabricación de los dos demostradores se ha utilizado el modo de soldadura AC pulsado (Job 392), ya que en la sección anterior con este modo se han reportado los mejores resultados en términos de porosidad. Además, en este caso, las piezas a fabricar no son excesivamente grandes, por lo que las tasas de aporte obtenidas con este modo han sido suficientes y no ha sido necesario el modo de trabajo GMAW pulsado. En la Tabla V-12 se pueden apreciar los parámetros de aporte utilizados.

Tabla V-12. Parámetros utilizados para la fabricación de una única torreta y las cuatro torretas matriciales

N. capa	WFR (m/min)	DR (kg/h)	TS (mm/min)
1-2	8	1,44	1140
Resto	8	1,44	1540

Las trayectorias de aporte de las diferentes torretas se han diseñado mediante el software PowerMill (Autodesk, Estados Unidos). En este software se puede definir la altura de capa y el tipo de trayectoria a seguir y el programa calcula automáticamente las trayectorias deseadas utilizando algoritmos internos. En este caso, se ha elegido fabricar las piezas con trayectorias de oscilación, es decir, primero se realiza el contorno y después se completa la capa mediante movimientos oscilatorios (Figura V-17).

Para ello, gracias al estudio llevado a cabo en secciones anteriores de este capítulo (modelos de anchura y altura, Ecs. 18 y 21), se han determinado las características geométricas de los cordones obtenidos con los parámetros utilizados y mediante esta información se han podido programar las trayectorias de aporte. De esta manera, se ha fijado la anchura teórica del cordón en 5 mm y la altura de capa en 1,6 mm. La distancia entre las pasadas consecutivas de la oscilación ha sido de 3 mm y la distancia de la oscilación al cordón de

contorno de 2 mm. En capas consecutivas, la dirección de la oscilación ha cambiado y las oscilaciones se vuelven perpendiculares de una a la siguiente, como se puede ver en la Figura V-17 capa [i] y capa [i + 1]. Además, la dirección del cordón de contorno también ha cambiado en capas sucesivas.

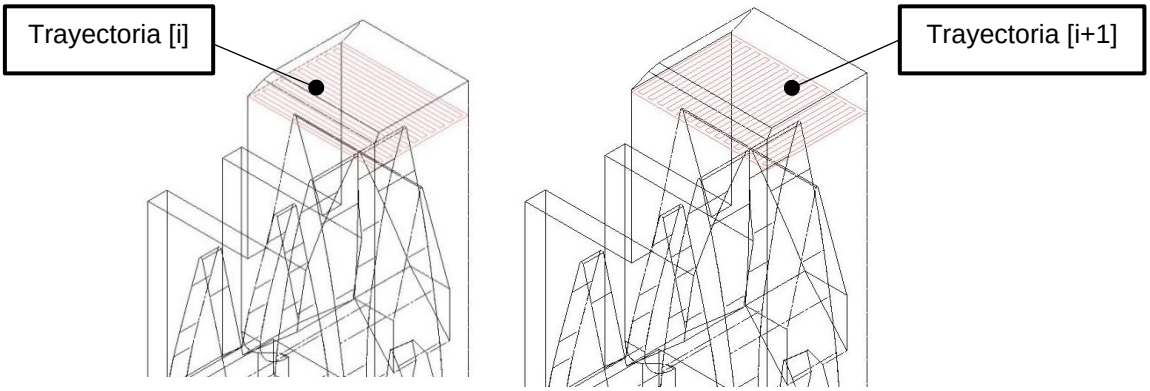


Figura V-17. Trayectorias de aporte de dos capas consecutivas de la torreta de aluminio

Por último, el demostrador matricial de cuatro torretas se ha programado de igual manera que el demostrador de la única torreta. Sin embargo, en este caso se han fabricado las cuatro torretas a la vez, es decir, se han fabricado las cuatro de manera simultánea capa a capa, aportando primero la primera capa de todas y pasando después a la siguiente capa de todas. En la Figura V-18 se puede observar el demostrador matricial fabricado.



Figura V-18. Cuatro torretas fabricadas matricialmente

El sentido de fabricar piezas de manera matricial es que habitualmente, en las piezas fabricadas mediante WAAM el tiempo de fabricación se diferencia en tiempos de aporte (cuando la antorcha de soldadura está encendida y se está aportando material), en tiempos de movimientos en vacío y en tiempos de enfriamiento entre capas, donde el robot está en reposo esperando a que el pirómetro marque una temperatura comandada antes de aportar la siguiente capa. Los periodos de tiempo utilizados para el enfriamiento y el posicionamiento suman el tiempo de inactividad (*Idle time*).

Es de suponer que si estos tiempos de enfriamiento se utilizan para el aporte de otras piezas, la productividad del sistema aumenta considerablemente. Exactamente esto es lo que se hace en una estrategia de aporte matricial, aprovechar los tiempos de inactividad para fabricar otra pieza en paralelo. En concreto, en la torreta de aluminio, esta estrategia no tiene tanto sentido porque los tiempos de enfriamiento, gracias a la alta capacidad de disipación de calor del aluminio, son despreciables. Aun así, en otros materiales como los aceros, las aleaciones de níquel, Invar, etc. puede ser muy útil este tipo de estrategia.

4 Conclusiones

En este capítulo se ha recopilado toda la experimentación llevada a cabo mediante el sistema robótico diseñado en el capítulo III en aluminio 5356. Aunque la experimentación se materialice en un aluminio concreto los resultados generales, excepto los resultados metalúrgicos y de propiedades mecánicas, son extrapolables a otras aleaciones de aluminio. Entre estos resultados, se encuentran los parámetros utilizados y las conclusiones sacadas de los diferentes modos de trabajo.

En primer lugar, en este capítulo se ha estudiado el modo de trabajo AC pulsado y se ha comparado con los dos modos de trabajo más utilizados hasta la fecha en literatura previa para aleaciones de aluminio: GMAW pulsado y Cold Arc. Para ello, se ha fabricado con cada modo una batería compuesta por cordones únicos y una pared simple. Las principales conclusiones obtenidas son las siguientes:

- La señal de intensidad en las fuentes de soldadura sinérgicas solo se rige por el valor de la velocidad de alimentación de hilo, habiendo establecido previamente el modo de trabajo, el material, el diámetro del hilo y el gas protector. La señal AC pulsada es una señal pulsada de polaridad variable, mientras que la GMAW pulsada solo tiene pulsos con valores positivos y Cold Arc tiene una forma de pulso diferente con valores positivos y frecuencias más bajas e inciertas, logrando gotas más grandes, pero menos frecuentes. Específicamente, el volumen de las gotas transferidas en el modo Cold Arc es casi tres veces mayor que el volumen de las gotas transferidas en el modo AC pulsado para altas tasas de aporte.
- Se ha demostrado de nuevo que el flujo de calor es un parámetro de vital importancia en el proceso WAAM, porque puede influir en la forma geométrica de los cordones obtenidos. El modo GMAW pulsado tiene la

mayor entrada de calor, seguido por el modo AC pulsado y finalmente del modo Cold Arc. Cuanto mayor sea el suministro térmico, mayor es el ancho del cordón y menor la altura.

- En general, las penetraciones en los modos AC pulsado y Cold Arc en promedio son 14% y 20% más bajas que en el modo GMAW pulsado, porque los valores de corriente máxima son mayores. Es decir, cuanto mayor sea el valor de la intensidad de pico, mayor es la profundidad de la penetración.
- La batería de ensayos también ha permitido generar modelos de anchura y altura de los cordones únicos para cada modo de trabajo, formulados en las Ecs. 16-21 de este capítulo. Con estos modelos se obtienen los datos necesarios para programar las trayectorias de aporte de material, como distancia de solape y crecimiento por capa.
- De acuerdo con los resultados reportados en cordones individuales, la pared más ancha es la pared GMAW pulsado y la más estrecha es la pared Cold Arc. También se aprecia que tanto las paredes GMAW pulsado como AC pulsado tenían menos ondulación superficial en comparación con la pared Cold Arc.
- Las microestructuras de las paredes de los tres modos de trabajo son similares: las estructuras de grano equiaxial y las estructuras de grano columnar se intercalan, con áreas de grano columnar cerca de los límites de capa. No obstante, se pueden apreciar diferencias en la distribución granulométrica. El modo AC pulsado obtiene el tamaño de grano promedio más grande y en los modos GMAW pulsado y Cold Arc los tamaños de grano son 17,9% y 54,9% más pequeños, respectivamente. El tamaño de grano promedio más pequeño obtenido en el modo Cold Arc se debe al bajo suministro térmico de este proceso.
- Por último, el análisis del nivel de porosidad es un tema clave en la fabricación aditiva de aleaciones de aluminio. El modo AC pulsado reduce sustancialmente los niveles de porosidad, consiguiendo valores de 0,13% en el material aportado debido a la polaridad variable del proceso.

En segundo lugar, se han estudiado la microestructura y las propiedades mecánicas de una pared solapada fabricada en este aluminio. En esta pared no se observan defectos macroscópicos y se obtiene una microestructura de granos equiaxiales dejando aparte la zona de unión con el sustrato. Además, también se han observado poros microscópicos de dimensiones inferiores a 100 µm. En cuanto a la zona de unión con el sustrato, la microestructura se vuelve columnar y los valores de dureza aumentan ligeramente. En lo

concerniente a las propiedades mecánicas, los valores obtenidos son similares a los valores de las paredes fabricadas mediante WAAM basado en GMAW en aluminio 5356 en literatura previa, reportados en el capítulo II apartado 5.2 y a los predefinidos por el proveedor del hilo.

Por último, para la validación de los resultados obtenidos, se han fabricado dos demostradores. Por un lado, se ha fabricado un molde para la fabricación de piezas de fibra de carbono demostrando que el proceso WAAM basado en GMAW tiene un gran potencial para fabricar piezas de aluminio de un tamaño considerable de una manera competitiva. Además, en esta pieza, como en la pieza con álabes fabricada como demostrador en el capítulo IV en acero, se observa que, dependiendo de la geometría y estrategia de aporte, todas las partes de una misma capa no crecen de manera uniforme. Se concluye que en estos casos lo mejor es ajustar los parámetros de fabricación para las diferentes zonas de las capas.

Por otro lado, se han fabricado las torretas de aluminio, tanto de manera unitaria como de manera matricial. El diseño de estas torretas se ha optimizado topológicamente introduciendo las restricciones del proceso WAAM y añadiendo las propiedades geométricas y mecánicas obtenidas en este aluminio. De esta manera, se demuestra que la optimización topológica sirve para obtener diseños aligerados. El resultado de este proceso de optimización topológica ha sido una reducción de peso del 62,8% en comparación con el diseño original. Gracias al estudio preliminar llevado a cabo en secciones anteriores de este capítulo (modelos de anchura y altura, Ecs. 18 y 21), se han determinado las características geométricas de los cordones obtenidos con los parámetros utilizados y se han podido programar las trayectorias de aporte. En este caso, se ha tomado la decisión de fabricar las piezas con trayectorias de oscilación, es decir, primero aportando el contorno y después llenándolo mediante movimientos oscilatorios.

Finalmente, se han fabricado cuatro demostradores de la torreta de aluminio matricialmente. En la estrategia matricial, se utilizan los tiempos de enfriamiento de una pieza para el aporte de otras piezas en el mismo sustrato. De esta manera, la productividad aumenta considerablemente, sobre todo en materiales que necesitan tiempos de enfriamiento de mayor duración.

Estos resultados han sido publicados en los siguientes artículos: [Aldalur, 2021-a], [Aldalur, 2021-b], [Veiga, 2021] y [Suárez, 2021].

CAPÍTULO VI

CAPÍTULO VI: APORTACIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

1 Aportaciones

En el presente trabajo de Tesis Doctoral se ha presentado en primer lugar una revisión de Estado del Arte sobre la tecnología WAAM basado en GMAW. A continuación, se ha desarrollado un sistema robótico automático para el aporte de piezas mediante esta tecnología que incorpora sistemas de monitorización y de control diseñados específicamente para este proceso. En el capítulo IV, se ha realizado un estudio exhaustivo del proceso WAAM basado en GMAW en acero dulce ER70S-6 determinando la influencia de los diferentes parámetros de proceso y de las estrategias de aporte. Por último, en el Capítulo V se ha estudiado el aporte de material en la aleación de aluminio 5356, determinando la influencia de los diferentes modos de trabajo.

De este modo las principales aportaciones del presente trabajo de investigación pueden ser resumidas en los siguientes puntos:

1- Se ha desarrollado un sistema robótico para la fabricación de piezas mediante la tecnología WAAM basado en GMAW. Este sistema está equipado con un robot antropomórfico que lleva una antorcha de soldadura, un escáner láser para la medición de la geometría *in-situ* y un pirómetro instalados en su muñeca.

2- Se ha desarrollado un algoritmo de control de altura y se ha implementado en el sistema robótico desarrollado. En este control, la altura de cada capa se ajusta en función de la intensidad real monitorizada durante el proceso para mantener este valor dentro de un rango de valores óptimos.

3- Se ha demostrado que el proceso WAAM basado en GMAW es un proceso estable y robusto tanto para aceros como para aleaciones de aluminio. Los resultados muestran que tanto las propiedades mecánicas, como la integridad metalúrgica de las piezas fabricadas están dentro de los valores esperados y comparables con los obtenidos en otros procesos como la fundición.

4- Se ha estudiado la influencia de los principales parámetros del proceso WAAM basado en GMAW y los diferentes modos de trabajo. En concreto, se ha analizado la influencia de la velocidad de alimentación de hilo (WFR) y de la velocidad de avance (TS). Además, también se ha analizado la influencia de la utilización de diferentes modos de trabajo en la penetración, la dilución, la microestructura y las durezas obtenidas en

cordones únicos. Con este estudio se ha demostrado que el modo de trabajo Force Arc no es adecuado para los procesos aditivos por su alto suministro térmico y que el modo Cold Arc está solamente recomendado para aplicaciones concretas de piezas con paredes muy delgadas.

5- Se han comparado dos estrategias de aporte de material, la estrategia de oscilación y la estrategia de solape, en términos de crecimiento por capa, flujo de calor, tiempos de enfriamiento y fabricación, macroestructura, microestructura, durezas, propiedades mecánicas y geometría. De esta experimentación se ha concluido que en la estrategia oscilada la concentración de energía y calor es mayor y la productividad también aumenta. En cuanto a la microestructura obtenida, es diferente en las dos estrategias y los valores de UTS y YS son mayores en la pared solapada que en la oscilada debido al tamaño de grano más pequeño. Por último, la planitud en la capa superior se mejora gracias al uso de la estrategia oscilatoria.
6- Se ha analizado la influencia de los diferentes modos de trabajo adecuados para aleaciones de aluminio: GMAW pulsado, Cold Arc y AC pulsado. Para este estudio de modos de trabajo, se ha fabricado una batería de cordones para definir los parámetros óptimos para fabricar las tres paredes simples utilizadas para el análisis. Las tres paredes simples se analizan en términos de geometría, microestructura y porosidad. La conclusión principal es que con el modo AC pulsado se reduce considerablemente la porosidad obtenida.
7- Además, de la batería de cordones fabricada en aluminio también se han obtenido modelos de anchura y altura de cordones muy útiles para el diseño de trayectorias de aporte.

Como el resultado de este trabajo de investigación, se han realizado catorce publicaciones en diferentes revistas científicas y una ponencia en un congreso nacional.

Publicaciones como autor principal:

- ✓ **E. Aldalur**, F. Veiga, A. Suárez, J. Bilbao, A. Lamikiz, **Analysis of the wall geometry with different strategies for high deposition wire arc additive manufacturing of mild steel**, Metals. 10 (2020) 1-19, https://doi.org/10.3390/met10070892
- ✓ **E. Aldalur**, F. Veiga, A. Suárez, J. Bilbao, A. Lamikiz, **High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies and heat input effect on microstructure and mechanical properties**, Journal of Manufacturing Processes. 58 (2020) 615-626, https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.060

- ✓ **E. Aldalur**, A. Suárez, F. Veiga, **Metal transfer modes for Wire Arc Additive Manufacturing Al-Mg alloys: Influence of heat input in microstructure and porosity**, Journal of Material Processing Technology, 297 (2021) 117271, https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117271
- ✓ **E. Aldalur**, A. Panfilo, A. Súarez, J. M. Ugartemendia, **Hari metalikoetan eta arku elektrikoan oinarritutako fabrikazio-gehigarriko WAAM teknologiaren oinarriak eta aplikazioak**, EKAIA Euskal Herriko Unibertsitateko Zientzia eta Teknologia Aldizkaria. (2021), https://doi.org/10.1387/ekaia.22367
- ✓ **E. Aldalur**, A. Suárez, T. Artaza, F. Veiga, **Thermal expansion behaviour of Invar 36 alloy parts fabricated by wire-arc additive manufacturing** (Under review)

Como Co-autor:

- ✓ M. Casuso, F. Veiga, A. Suárez, T. Bhujangrao, **E. Aldalur**, T. Artaza, J. Amondarain, A. Lamikiz, **Model for the prediction of deformations in the manufacture of thin-walled parts by wire arc additive manufacturing technology**, Metals. 11 (2021), https://doi.org/10.3390/met11050678
- ✓ A. Suárez, **E. Aldalur**, F. Veiga, T. Artaza, I. Tabernero, A. Lamikiz, **Wire arc additive manufacturing of an aeronautic fitting with different metal alloys: From the design to the part**, Journal of Manufacturing Processes. 64 (2021) 188-197, https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.012
- ✓ F. Veiga, A. Suárez, **E. Aldalur**, I. Goenaga, J. Amondarain, **Wire arc additive manufacturing process for topologically optimized aeronautical fixtures**, 3D Printing and Additive Manufacturing, 0, 0, 2021, https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0008
- ✓ F. Veiga, A. Suárez, **E. Aldalur**, T. Bhujangrao, **Effect of the Metal Transfer Mode on the Symmetry of Bead Geometry in WAAM** Aluminum, Symmetry, 2021, 13, 1245, https://doi.org/10.3390/sym13071245
- ✓ F. Veiga, A. Suárez, **E. Aldalur**, T. Artaza, **Wire arc additive manufacturing of Invar parts: bead geometry and melt pool monitoring,** Measurements, 2021, https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110452
- ✓ A. Suárez, T. Artaza, **E. Aldalur**, F. Veiga, **Effect of the heat input on wire-arc additive manufacturing of Invar 36 alloy: microstructure and mechanical properties** (Under review)

- ✓ A. Suárez, F. Veiga, T. Bhujangrao, **E. Aldalur**, **Study of the mechanical behavior of topologically optimized AW-DED aerospace fixtures** (Under review)
- ✓ A. Suárez, **E. Aldalur,** F. Veiga, P. Gomez, A. Panfilo, **Microstructure and Mechanical properties of Mild Steel-Stainless Steel Bimetallic Structures Built using Wire Arc Additive Manufacturing** (Under review)
- ✓ F. Veiga, A. Suarez, **E. Aldalur,** R. Abad, **Different path strategies for wire-arc additive manufacturing of crossing intersections from stainless steel SS316L-Si** (Under review)

Ponencias en congresos nacionales:

- ✓ **E. Aldalur,** A. Suárez, I. Tabernero, A. Lamikiz, **Desarrollo de la fabricación aditiva mediante arco eléctrico y aporte de hilo (WAAM) de alta deposición basado en** GMAW, Congreso de Máquina Herramienta (CMH), 2019.

2 Líneas futuras

La presente línea de investigación abre nuevas líneas donde trabajar en más áreas de la tecnología WAAM basado en GMAW, entre las que merece la pena destacar:

- La incorporación de un segundo hilo caliente (HW) al proceso WAAM basado en GMAW para aumentar la productividad e incluso fabricar piezas multimaterial. Como se observa en la Figura VI-1, el HW es un segundo hilo que se introduce en el baño fundido creado por el arco eléctrico del hilo principal (electrodo). A este segundo hilo HW se le introduce una intensidad baja para calentarlo, de esta manera, se aprovecha el calor excedente creado por el arco eléctrico del primer hilo para fundir el segundo, pudiendo introducir más material, reduciendo los tiempos de espera para enfriamiento y disminuyendo la dilución. En la Figura VI-1 se muestra una idea preliminar que se ha desarrollado en las investigaciones que se están llevando a cabo en la actualidad para incorporar este segundo hilo al sistema robótico diseñado en el capítulo III.

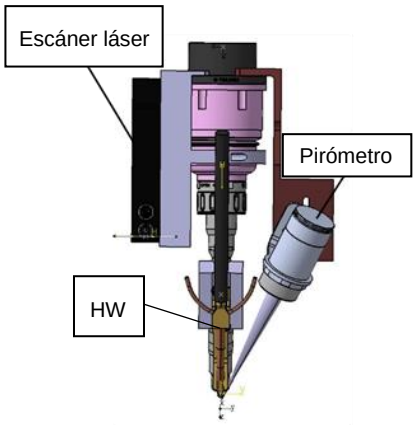


Figura VI-1. Representación de la antorcha del sistema robótico desarrollado en esta tesis con la incorporación del HW

- En el sistema robótico desarrollado en esta tesis, en futuros estudios se podría valorar la opción de integrar más sistemas de monitorización y control on-line, es decir, que monitoricen y actúen durante el proceso WAAM para un mayor control. Una opción interesante sería la introducción de una cámara termográfica que pudiera medir y controlar el baño fundido y dependiendo de estos datos se podría llegar a actuar en el proceso para evitar defectos y tener un proceso controlado.

- En esta tesis se han creado modelos de anchura y altura de los cordones para la aleación de aluminio 5356. Estos modelos se deberían de extender a más materiales y ampliar los rangos de parámetros, ya que son de gran utilidad para la definición de las trayectorias y crecimientos de capa.

- También en futuros estudios se deberían de estudiar más tipos de estrategias de aporte para conseguir mayor versatilidad según la geometría a fabricar y acortar tanto los tiempos de aporte de material como los tiempos de espera para enfriamiento y movimientos en vacío.

- Otra línea sería estudiar la influencia de diversos parámetros de aporte que se han quedado al margen en el desarrollo de esta tesis por la ya compleja cuestión de tener todos los parámetros en cuenta. De esta manera, por ejemplo, en esta tesis, en todo momento, se ha utilizado la orientación de la antorcha perpendicular al sustrato, pero en futuros estudios se debería de variar este parámetro para observar su influencia en las características del material aportado. Por otro lado, se prevé que en futuros estudios también se deberá de analizar el proceso dos tiempos especiales determinando los mejores parámetros de rampas para cada material.

- Además, sería interesante estudiar la integridad de los componentes aportados con la tecnología WAAM basado en GMAW mediante técnicas NDT, para analizar su integridad metalúrgica y la calidad del material aportado. En

especial, sería de gran interés introducir estas técnicas en las aleaciones de aluminio, a causa de la porosidad inherente de los procesos de fabricación aditiva en este tipo de materiales.

- Por último, se podrían estudiar los postprocesos necesarios en estas piezas, incluyendo los procesos de mecanizado posterior para las piezas fabricadas mediante la tecnología WAAM basado en GMAW, pudiendo incluso plantear la idea de máquinas híbridas capaces de integrar el proceso de aporte de material mediante WAAM y el mecanizado posterior en la misma cinemática.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

[Abe, 2020] Abe, T., Kaneko, J., & Sasahara, H. *Thermal sensing and heat input control for thin-walled structure building based on numerical simulation for wire and arc additive manufacturing*. Additive Manufacturing, 2020, 35, 101357.

[ADDILAN, 2021] ADDILAN S.L., www.addilan.com, 2021.

[Aldalur, 2020-a] Aldalur, E., Veiga, F., Suárez, A., Bilbao, J., & Lamikiz, A. *High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies and heat input effect on microstructure and mechanical properties.* Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58, 615–626.

[Aldalur, 2020-b] Aldalur, E., Veiga, F., Suárez, A., Bilbao, J,. & Lamikiz, A. *Analysis of the wall geometry with different strategies for high deposition wire arc additive manufacturing of mild steel.* Metals, 2020, 10(7), 1–19.

[Aldalur, 2021-a] Aldalur, E., Panfilo, A., Súarez, A., & M. Ugartemendia, J. *Hari metalikoetan eta arku elektrikoan oinarritutako fabrikazio-gehigarriko WAAM teknologiaren oinarriak eta aplikazioak*. EKAIA Euskal Herriko Unibertsitateko Zientzia Eta Teknologia Aldizkaria, 2020.

[Aldalur, 2021-b] Aldalur, E., Suárez, A., & Veiga, F. *Metal transfer modes for Wire Arc Additive Manufacturing Al-Mg alloys: Influence of heat input in microstructure and porosity.* Journal of Material Processing Technology, 2021, 297, 117271.

[AML3D, 2021] AML3D. https://aml3d.com/, 2021.

[AMPOWER, 2020] AMPOWER. https://am-power.de/, 2020.

[Artaza, 2017] Artaza, T., Alberdi, A., Murua, M., Gorrotxategi, J., Frías, J., Puertas, G., … Suárez, A. *Design and integration of WAAM technology and in situ monitoring system in a gantry machine.* Procedia Manufacturing, 2017, 13, 778–785.

[Artaza, 2019] Artaza, T., Suárez, A., Murua, M., Garcia, J., Tabernero, I., & Lamikiz, A. *Wire Arc Additive Manufacturing of Mn4Ni2CrMo Conference Steel : Comparison of Mechanical and Metallographic Properties of PAW and GMAW.* Procedia Manufacturing, 2019, 41, 1071–1078.

[Artaza, 2020-a] Artaza, Teresa, Bhujangrao, T., Suárez, A., Veiga, F., & Lamikiz, A. *Influence of Heat Input on the Formation of Laves Phases and Hot Cracking in Plasma Arc Welding (PAW) Additive Manufacturing of Inconel 718.* Metals, 2020, 1–17.

[Artaza, 2020-b] Artaza, T., Suárez, A., Veiga, F., Braceras, I., Tabernero, I., Larrañaga, O., & Lamikiz, A. *Wire arc additive manufacturing Ti6Al4V aeronautical parts using plasma arc welding: Analysis of heat-treatment processes in different atmospheres.* Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(6), 15454–15466.

[Azarniya, 2019] Azarniya, A., Garmendia, X., Mirzaali, M. J., Yen, C., Ahn, J., Miranda, G., … Zadpoor, A. A. *Additive manufacturing of Ti6Al4V parts through laser metal deposition (LMD): Process, microstructure, and mechanical properties.* Journal of Alloys and Compounds, 2019, 804, 163–191.

[Babu, 2024] Babu, S. S. (2004). *The mechanism of acicular ferrite in weld deposits.* Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2024, 8(3–4), 267–278.

[Bai, 2018] Bai, X., Colegrove, P., Ding, J., Zhou, X., Diao, C., Bridgeman, P., … Williams, S. *Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 124, 504–516.

[Bandyopadhyay, 2018] Bandyopadhyay, A., & Heer, B. *Additive manufacturing of multi-material structures.* Materials Science and Engineering R: Reports. 2018.

[Baker, 1925] R. Baker. (1925). *Method of making decorative articles*. US Patent, 1–3.

[Bermingham, 2018] Bermingham, M. J., Nicastro, L., Kent, D., Chen, Y., & Dargusch, M. S. *Optimising the mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by wire + arc additive manufacturing with post-process heat treatments*. Journal of Alloys and Compounds, 2018.

[Bhatt, 2019] Bhatt, P. M., Kabir, A. M., Peralta, M., Bruck, H. A., & Gupta, S. K. *A robotic cell for performing sheet lamination-based additive manufacturing.* Additive Manufacturing, 2019, 27, 278–289.

[Bhavar, 2014] Bhavar, V., Kattire, P., Patil, V., Khot, S., Gujar, K., & Singh, R. *A Review on Powder Bed Fusion Technology of Metal Additive Manufacturing.* Conference Paper, 2014.

[Caballero, 2019] Caballero, A., Ding, J., Ganguly, S., & Williams, S. *Wire + Arc Additive Manufacture of 17-4 PH stainless steel: Effect of different processing conditions on microstructure, hardness, and tensile strength*. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 268, 54–62.

[Casuso, 2021] Casuso, M., Veiga, F., Suárez, A., Bhujangrao, T., Aldalur, E., Artaza, T., … Lamikiz, A. *Model for the prediction of deformations in the manufacture of thin-walled parts by wire arc additive manufacturing technology*. Metals, 2021, 11(5).

[Chen, 2015] Chen, D., Chen, M., & Wu, C. *Effects of phase difference on the behavior of arc and weld pool in tandem P-GMAW.* Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225, 45–55.

[Chen, 2017] Chen, J., Zong, R., Wu, C., Padhy, G. K., & Hu, Q. *Influence of low current auxiliary TIG arc on high speed TIG-MIG hybrid welding.* Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243, 131–142.

[Chin, 2020] Chin, S. Y., Dikshit, V., Priyadarshini, B. M., & Zhang, Y. *Powder-based 3D printing for the fabrication of device with micro and mesoscale features*. Micromachines, 2020, 11(7), 29–40.

[Choi, 1978] Choi, B. Y. C. L. *A Study of Microstructural Progression in As-Deposited W e l d Metal*, 1978, 1–5.

[Cong, 2015] Cong, B., Ding, J., & Williams, S. *Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy.* International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76 (9–12), 1593–1606.

[Cong, 2017] Cong, B., Qi, Z., Qi, B., Sun, H., Zhao, G., & Ding, J. *A Comparative Study of Additively Manufactured Thin Wall and Block Structure with Al-6.3%Cu Alloy Using Cold Metal Transfer Process*. Applied Sciences, 2017, 7(3), 275.

[Cook, 2020] Cook, P. S., & Murphy, A. B. *Simulation of melt pool behaviour during additive manufacturing: Underlying physics and progress.* Additive Manufacturing, 2020, 31, 100909.

[Craveiro, 2019] Craveiro, F., Duarte, J. P., Bartolo, H., & Bartolo, P. J. *Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0.* Automation in Construction, 2019, 103, 251–267.

[Cunningham, 2018] Cunningham, C. R., Flynn, J. M., Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. T. *Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing*. Additive Manufacturing, 2018, 22, 672–686.

[Damen, 2021] Damen Shipyard, https://www.damen.com/, 2021.

[Delic, 2020] Delic, M., & Eyers, D. R. *The effect of additive manufacturing adoption on supply chain flexibility and performance: An empirical analysis from the automotive industry*. International Journal of Production Economics, 2020, 228, 107689.

[Denlinger, 2015] Denlinger, E. R., Heigel, J. C., Michaleris, P., & Palmer, T. A. *Effect of inter-layer dwell time on distortion and residual stress in additive manufacturing of titanium and nickel alloys.* Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215, 123–131.

[Derekar, 2019] Derekar, K., Lawrence, J., Melton, G., Addison, A., Zhang, X., & Xu, L. *Influence of Interpass Temperature on Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Aluminium Alloy Components.* MATEC Web of Conferences, 2019, 269, 05001.

[Derekar, 2018] Derekar, K. S. *A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium*. Materials Science and Technology, 2018.

[Derekar, 2020] Derekar, Karan S., Addison, A., Joshi, S. S., Zhang, X., Lawrence, J., Xu, L., … Griffiths, D. *Effect of pulsed metal inert gas (pulsed-MIG) and cold metal transfer (CMT) techniques on hydrogen dissolution in wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminium.* International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(1–2), 311–331.

[Dev Singh, 2020] Dev Singh, D., Mahender, T., & Raji Reddy, A. *Powder bed fusion process: A brief review*. Materials Today: Proceedings, 2020, 2–7.

[Dhinakaran, 2020] Dhinakaran, V., Ajith, J., Fathima Yasin Fahmidha, A., Jagadeesha, T., Sathish, T., & Stalin, B. *Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) process of nickel based superalloys-A review.* Materials Today: Proceedings, 2020, 21, 920–925.

[Dilberoglu, 2017] Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. *The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0*. Procedia Manufacturing, 2017, 11, 545–554.

[Ding, 2015-a] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. *A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM).* Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2015, 31, 101–110.

[Ding, 2015-b] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. *Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81, 465–481.

[Dinovitzer, 2019] Dinovitzer, M., Chen, X., Laliberte, J., Huang, X., & Frei, H. *Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure*. Additive Manufacturing, 2019, 26, 138–146.

[Dirisu, 2019] Dirisu, P., Ganguly, S., Mehmanparast, A., Martina, F., & Williams, S. *Analysis of fracture toughness properties of wire + arc additive manufactured high strength low alloy structural steel components.* Materials Science and Engineering A, 2019, 765, 138285.

[Dos Santos, 2017] Dos Santos, E. B. F., Pistor, R., & Gerlich, A. P. *High frequency pulsed gas metal arc welding (GMAW-P): The metal beam process*. Manufacturing Letters, 2017 11, 1–4.

[Ermakova, 2019] Ermakova, A., Mehmanparast, A., & Ganguly, S. *A review of present status and challenges of using additive manufacturing technology for offshore wind applications*. Procedia Structural Integrity, 2019, 17, 29–36.

[Everton, 2016] Everton, S. K., Hirsch, M., Stavroulakis, P. I., Leach, R. K., & Clare, A. T. *Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing*. Materials and Design, 2016, 95, 431–445.

[EWM, 2021] EWM. *EWM Hightec Welding.* http://www.ewm-group.com, 2021.

[ExOne, 2021] ExOne. *X1 160Pro ExOne.* https://www.exone.com/en-US/X1-160Pro, 2021.

[Eyers, 2017] Eyers, D. R., & Potter, A. T. I*ndustrial Additive Manufacturing: A manufacturing systems perspective*. Computers in Industry, 2017, 92–93, 208–218.

[Fang, 2012] Fang, C. fu, Meng, X. hui, Hu, Q. xian, Wang, F. jiang, Ren, H., Wang, H. song, … Mao, M. *TANDEM and GMAW Twin Wire Welding of Q690 Steel Used in Hydraulic Support*. Journal of Iron and Steel Research International, 2012, 19(5), 79–85.

[Fang, 2021] Fang, X., Zhang, L., Chen, G., Huang, K., Xue, F., Wang, L., … Lu, B. *Microstructure evolution of wire-arc additively manufactured 2319 aluminum alloy with interlayer hammering*.” Materials Science and Engineering A, 2021, 800(99), 140168.

[Ferraresi, 2003] Ferraresi, V. A., Figueiredo, K. M., & Ong, T. H. *Metal transfer in the aluminum gas metal arc welding.* Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2003, 25(3), 229–234.

[Frazier, 2014] Frazier, W. E. *Metal additive manufacturing: A review.* Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6), 1917–1928.

[Fronius, 2021] Fronius, https://www.fronius.com/es-es/spain, 2021.

[GEFERTEC, 2021] GEFERTEC, https://www.gefertec.de/, 2021.

[General Electric, 2017] General Electric, *GE Global Research, 3D Printing New Parts for Aircraft Engines, 2017*.

[GE Additive, 2021-a] General Electric Additive,. X Line 2000R-Concept Laser. https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/dmlm-machines/x-line-2000r, 2021.

[GE Additive, 2021-b] General Electric Additive. Arcam EBM Spectra L. https://www.ge.com/additive/additive manufacturing/machines/arcam-ebm-spectra-l, 2021.

[Geng, 2017] Geng, H., Li, J., Xiong, J., Lin, X., & Zhang, F. *Optimization of wire feed for GTAW based additive manufacturing*. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243, 40–47.

[Ghaffari, 2019] Ghaffari, M., Vahedi Nemani, A., Rafieazad, M., & Nasiri, A. *Effect of Solidification Defects and HAZ Softening on the Anisotropic Mechanical Properties of a Wire Arc Additive-Manufactured Low-Carbon Low-Alloy Steel Part*. Jom, 2019, 71(11), 4215–4224.

[Gisario, 2019] Gisario, A., Kazarian, M., Martina, F., & Mehrpouya, M. *Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review*. Journal of Manufacturing Systems, 2019, 53, 124–149.

[Gokuldoss, 2017] Gokuldoss, P. K., S. K. and J. E. *Additive Manufacturing Processes : Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting — Selection Guidelines*. Materials, 2017, 10(672).

[González, 2017] González, H., Arrizubieta, I., Calleja, A., Ruiz, J. E., & Lamikiz, A. *CAM development for additive manufacturing in turbo-machinery components.* Procedia Manufacturing, 2017, 13, 802–809.

[Greer, 2019] Greer, C., Nycz, A., Noakes, M., Richardson, B., Post, B., Kurfess, T., & Love, L. *Introduction to the design rules for Metal Big Area Additive Manufacturing*. Additive Manufacturing, 2019, 27, 159–166.

[Grong, 1986] Grong, O., & Matlock, D. K. *Microstructural development in mild and low-alloy steel weld metals.* International Metals Reviews, 1986, 31(1), 27–48.

[Gu, 2014] Gu, J., Cong, B., Ding, J., Williams, S. W., & Zhai, Y. *WIRE+ARC additive manufacturing of aluminium*. *25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*; An Additive Manufacturing Conference, SFF 2014, 451–458.

[Gu, 2016] Gu, J., Ding, J., Williams, S. W., Gu, H., Ma, P., & Zhai, Y. *The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys.* Journal of Materials Processing Technology, 2016, 230, 26–34.

[Gu, 2018] Gu, J., Wang, X., Bai, J., Ding, J., Williams, S., Zhai, Y., & Liu, K. *Deformation microstructures and strengthening mechanisms for the wire+arc additively manufactured Al-Mg4.5Mn alloy with inter-layer rolling.* Materials Science and Engineering A, 2018, 712, 292–301.

[Gu, 2019] Gu, J., Gao, M., Yang, S., Bai, J., Ding, J., & Fang, X. *Pore formation and evolution in wire + arc additively manufactured 2319 Al alloy*. Additive Manufacturing, 2019, 30, 100900.

[Gu, 2020] Gu, J., Yang, S., Gao, M., Bai, J., Zhai, Y., & Ding, J. *Micropore evolution in additively manufactured aluminum alloys under heat treatment and inter-layer rolling*. Materials and Design, 2020, 186, 108288.

[Günther, 2018-a] Günther, K., Bergmann, J. P., Zhang, C., Rosenberger, M., & Notni, G. *Hot Wire-Assisted Gas Metal Arc Welding of Ni-Based Hardfacing.* Welding Journal, 2018, 97, 99–107.

[Günther, 2018-b] Günther, K., Bergmann, J. P., & Suchodoll, D. *Hot wire-assisted gas metal arc welding of hypereutectic FeCrC hardfacing alloys: Microstructure and wear properties.* Surface and Coatings Technology, 2018, 334, 420–428.

[Guo, 2013] Guo, N., & Leu, M. C. *Additive manufacturing : technology , applications and research needs.* Front. Mech. Eng., 2013, 8(3), 215–243.

[Haden, 2017] Haden, C. V., Zeng, G., Carter, F. M., Ruhl, C., Krick, B. A., & Harlow, D. G. *Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties*. Additive Manufacturing, 2017, 16, 115–123.

[Hao, 2021] Hao, B., & Lin, G. *Additive manufacturing technology and its application in die manufacturing*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 632, 022077.

[Harrop, 2020] Harrop, J., & Collins, R. *3D Printing and Additive Manufacturing 2020-2030: COVID Edition*, 2020, Idtechex report.

[Haselhuhn, 2016] Haselhuhn, A. S., Buhr, M. W., Wijnen, B., Sanders, P. G., & Pearce, J. M. *Structure-property relationships of common aluminum weld alloys utilized as feedstock for GMAW-based 3-D metal printing*. Materials Science and Engineering A, 2016.

[Hauser, 2020] Hauser, T., Silva, A. Da, Reisch, R. T., Volpp, J., Kamps, T., & Kaplan, A. F. H. *Fluctuation effects in Wire Arc Additive Manufacturing of aluminium analysed by high-speed imaging.* Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56, 1088–1098.

[He, 2016] He, Y., Xu, Y., Chen, Y., Chen, H., & Chen, S. *Weld seam profile detection and feature point extraction for multi-pass route planning based on visual attention model.* Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 37, 251–261.

[Hejripour, 2019] Hejripour, F., Binesh, F., Hebel, M., & Aidun, D. K. *Thermal modeling and characterization of wire arc additive manufactured duplex stainless steel*. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 272, 58–71.

[Herderick, 2011] Herderick, E. *Additive manufacturing of metals: A review*. Materials Science and Technology Conference, 2011, 2(176252), 1413–1425.

[Herzog, 2016] Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. *Additive manufacturing of metals*. Acta Materialia, 2016, 117, 371–392.

[Horgar, 2018] Horgar, A., Fostervoll, H., Nyhus, B., Ren, X., Eriksson, M., & Akselsen, O. M. *Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire.* Journal of Materials Processing Technology, 2018, 259, 68–74.

[Hosseini, 2019] Hosseini, E., & Popovich, V. A. *A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718.* Additive Manufacturing, 2019, 30, 100877.

[Hu, 2021] Hu, Z., Hua, L., Qin, X., Ni, M., Ji, F., & Wu, M. *Molten pool behaviors and forming appearance of robotic GMAW on complex surface with various welding positions.* Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64, 1359–1376.

[Hughes, 2019] Hughes, J. P., Dos Santos, P. L., Down, M. P., Foster, C. W., Bonacin, J. A., Keefe, E. M., … Banks, C. E. *Single step additive manufacturing (3D printing) of electrocatalytic anodes and cathodes for efficient water splitting*. Sustainable Energy and Fuels, 2019, 4(1), 302–311.

[INTEGRADDE, 2021] INTEGRADDE project. http://www.integraddeproject.eu/.

[ISO/ASTM, 2015] ISO/ASTM. *ISO/ASTM 52900: Additive manufacturing - General principles - Terminology.* International Standard, 2015, 5, 1–26.

[Jafari, 2021] Jafari, D., Vaneker, T. H. J., & Gibson, I. *Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts*. Materials and Design, 2021, 202, 109471.

[Jafferson, 2021] Jafferson, J. M., & Chatterjee, D. *A review on polymeric materials in additive manufacturing.* Materials Today: Proceedings, 2021.

[Jardon, 2020] Jardon, Z., Guillaume, P., Ertveldt, J., Hinderdael, M., & Arroud, G. *Offline powder-gas nozzle jet characterization for coaxial laser-based Directed Energy Deposition*. Procedia CIRP, 2020, 94, 281–287.

[Jia, 2020] Jia, C., Liu, W., Chen, M., Guo, M., Wu, S., & Wu, C. *Investigation on arc plasma, droplet, and molten pool behaviours in compulsively constricted WAAM*. Additive Manufacturing, 2020, 34, 101235.

[Jin, 2020] Jin, W., Zhang, C., Jin, S., Tian, Y., Wellmann, D., & Liu, W. *Wire arc additive manufacturing of stainless steels: A review*. Applied Sciences, 2020, 10(5).

[Kah, 2013] Kah, P., Suoranta, R., & Martikainen, J. *Advanced gas metal arc welding processes.* International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(1–4), 655–674.

[Karlsson, 2019] Karlsson, D., Lindwall, G., Lundbäck, A., Amnebrink, M., Boström, M., Riekehr, L., … Jansson, U. *Binder Jetting of the AlCoCrFeNi Alloy.* Additive Manufacturing, 2019.

[Kim, 1993] Kim, Y.-S., & Eagar, T. W. *Metal Transfer in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding.* Welding Research Supplement, 1993, 279–287.

[Kittel, 2020] Kittel, J., Gasser, A., Wissenbach, K., Zhong, C., Schleifenbaum, J. H., Palm, F., … Siadat, A. *Case study on AM of an IN718 aircraft component using the LMD process*. Procedia CIRP, 2020, 94, 324–329.

[Klein, 2020] Klein, T., Schnall, M., Gomes, B., Warczok, P., Fleischhacker, D., & Morais, P. J. *Wire-arc additive manufacturing of a novel high-performance Al-Zn-Mg-Cu alloy: Processing, characterization and feasibility demonstration.* Additive Manufacturing, 2020, 101663.

[Kunchala, 2018] Kunchala, P., & Kappagantula, K. *3D printing high density ceramics using binder jetting with nanoparticle densifiers*. Materials and Design, 2018, 155, 443–450.

[Lee, 2017] Lee, J. Y., An, J., & Chua, C. K. *Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials.* Applied Materials Today, 2017, 7, 120–133.

[Lee, 2013] Lee, K. B., Kim, C., & Kim, D. S. *High deposition rate pulse gas metal arc welding for Al 5083 thick plate*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2013, 227(6), 848–854.

[Li, 2019] Li, N., Huang, S., Zhang, G., Qin, R., Liu, W., Xiong, H., … Blackburn, J. *Progress in additive manufacturing on new materials: A review.* Journal of Materials Science and Technology, 2019, 35(2), 242–269.

[Li, 2020-a] Li, C., Gu, H., Wang, W., Wang, S., Ren, L., & Wang, Z. *Effect of Heat Input on Formability , Microstructure , and Properties of Al–7Si–0.6Mg Alloys Deposited by CMT-WAAM Process.* Applied Sciences, 2020, 10, 70.

[Li, 2020-b] Li, S., Zhang, L. J., Ning, J., Wang, X., Zhang, G. F., Zhang, J. X., … Fatemeh, B. *Comparative study on the microstructures and properties of wire+arc additively manufactured 5356 aluminium alloy with argon and nitrogen as the shielding gas*. Additive Manufacturing, 2020, 34, 101206.

[Liang, 2018] Liang, Z., Jinglong, L., Yi, L., Jingtao, H., Chengyang, Z., Jie, X., & Dong, C. *Characteristics of metal droplet transfer in wire-arc additive manufacturing of aluminum alloy*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018.

[Liberini, 2017] Liberini, M., Astarita, A., Campatelli, G., Scippa, A., Montevecchi, F., Venturini, G., … Squillace, A. *Selection of Optimal Process Parameters for Wire Arc Additive Manufacturing.* In Procedia CIRP, 2017, 470–474.

[Lincoln Electric Additive, 2021] Lincoln Electric Additive. https://additive.lincolnelectric.com/, 2021.

[Lu, 2018] Lu, X., Lin, X., Chiumenti, M., Cervera, M., Li, J. J., Ma, L., … Huang, W. *Finite element analysis and experimental validation of the thermomechanical behavior in laser solid forming of Ti-6Al-4V.* Additive Manufacturing, 2018, 21, 30–40.

[Luo, 2018] Luo, Y., Li, J., Xu, J., Zhu, L., Han, J., & Zhang, C. *Influence of pulsed arc on the metal droplet deposited by projected transfer mode in wire-arc additive manufacturing*. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 259, 353–360.

[Ma, 2019] Ma, G., Zhao, G., Li, Z., Yang, M., & Xiao, W. *Optimization strategies for robotic additive and subtractive manufacturing of large and high thin-walled aluminum structures*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101, 1275–1292.

[Martina, 2015-a] Martina, F., & Williams, S. *Wire + arc additive manufacturing vs. traditional machining from solid: a cost comparison*, 2015.

[Martina, 2015-b] Martina, F., Colegrove, P. A., Williams, S. W., & Meyer, J. *Microstructure of Interpass Rolled Wire + Arc Additive Manufacturing Ti-6Al-4V Components.* Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 2015, 46(12), 6103–6118.

[Martina, 2018] Martina, F., Ding, J., Williams, S., Caballero, A., Pardal, G., & Quintino, L. *Tandem Metal Inert Gas process for high productivity Wire Arc Additive Manufacturing in stainless steel.* Additive Manufacturing, 2018.

[McAndrew, 2018] McAndrew, A. R., Alvarez Rosales, M., Colegrove, P. A., Hönnige, J. R., Ho, A., Fayolle, R., … Pinter, Z. *Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement*. Additive Manufacturing, 2018, 21, 340–349.

[Mcwilliams, 2017] Mcwilliams, A., & Spivey, C. *3D Metal Printing : Dark Art or Modern Blacksmith?,* 2017.

[Michel, 2019] Michel, F., Lockett, H., Ding, J., Martina, F., Marinelli, G., & Williams, S. *A modular path planning solution for Wire + Arc Additive Manufacturing*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 60, 1–11.

[Montevecchi, 2018] Montevecchi, F., Venturini, G., Grossi, N., Scippa, A., & Campatelli, G. *Idle time selection for wire-arc additive manufacturing: A finite element-based technique*. Additive Manufacturing, 2018, 21, 479–486.

[Mughal, 2005] Mughal, M. P., Fawad, H., Mufti, R. A., & Siddique, M. *Deformation modelling in layered manufacturing of metallic parts using gas metal arc welding: Effect of process parameters*. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2005, 13(7), 1187–1204.

[MX3D, 2021] MX3D. https://mx3d.com/, 2021.

[Nagesh, 2002] Nagesh, D. S., & Datta, G. L. *Prediction of weld bead geometry and penetration in shielded metal-arc welding using artificial neural networks.* Journal of Materials Processing Technology, 2002.

[Nassan, 2003] Nassan, J. *Gas Metal Arc Welding: Process Overview*, 96. Lincoln Electric.

[Ng, 2009] Ng, G. K. L., Jarfors, A. E. W., Bi, G., & Zheng, H. Y. *Porosity formation and gas bubble retention in laser metal deposition*. Applied Physics A: Materials Science and Processing, 97(3), 641–649.

[Oliveira, 2020] Oliveira, J. P., Santos, T. G., & Miranda, R. M. *Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice.* Progress in Materials Science, 2020, 107, 100590.

[Pan, 2018] Pan, Z., Ding, D., Wu, B., Cuiuri, D., Li, H., & Norrish, J*. Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review*. Transactions on Itelligent Welding Manufacturing, 2018.

[Panchenko, 2020] Panchenko, O., Kurushkin, D., Mushnikov, I., Khismatullin, A., & Popovich, A. *A high-performance WAAM process for Al–Mg–Mn using controlled short-circuiting metal transfer at increased wire feed rate and increased travel speed*. Materials and Design, 2020, 195, 109040.

[Paolini, 2019] Paolini, A., Kollmannsberger, S., & Rank, E. *Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods.* Additive Manufacturing, 2019, 30, 100894.

[Parandoush, 2017] Parandoush, P., & Lin, D. *A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites.* Composite Structures, 2017, 182, 36–53.

[Ponche, 2014] Ponche, R., Kerbrat, O., Mognol, P., & Hascoet, J. Y. *A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process.* Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, 30(4), 389–398.

[Prado-Cerqueira, 2017] Prado-Cerqueira, J. L., Diéguez, J. L., & Camacho, A. M. *Preliminary development of a Wire and Arc Additive Manufacturing system (WAAM).* Procedia Manufacturing, 2017, 13, 895–902.

[Pragana, 2021] Pragana, J. P. M., Sampaio, R. F. V., Bragança, I. M. F., Silva, C. M. A., & Martins, P. A. F. Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review. Advances in Industrial and Manufacturing Engineering, 2021, 2, 100032.

[Qi, 2018] Qi, Z., Cong, B., Qi, B., Sun, H., Zhao, G., & Ding, J. *Microstructure and mechanical properties of double-wire + arc additively manufactured Al-Cu-Mg alloys*. Journal of Materials Processing Technology, 2018.

[Queguineur, 2018] Queguineur, A., Rückert, G., Cortial, F., & Hascoët, J. Y. *Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications*. Welding in the World, 2018, 62(2), 259–266.

[RAMLAB, 2021] RAMLAB, https://www.ramlab.com/case-studies/.

[Rezvani, 2021] Rezvani Ghomi, E., Khosravi, F., Neisiany, R. E., Singh, S., & Ramakrishna, S. *Future of additive manufacturing in healthcare.* Current Opinion in Biomedical Engineering, 2021, 17, 100255.

[Rodrigues, 2019-a] Rodrigues, T. A., Duarte, V., Avila, J. A., Santos, T. G., Miranda, R. M., & Oliveira, J. P. *Wire and arc additive manufacturing of HSLA steel: Effect of thermal cycles on microstructure and mechanical properties.* Additive Manufacturing, 2019, 27, 440–450.

[Rodrigues, 2019] Rodrigues, T. A., Duarte, V., Miranda, R. M., Santos, T. G., & Oliveira, J. P. *Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM).* Materials, 2019, 12, 1121.

[Saboori, 2019] Saboori, A., Aversa, A., Marchese, G., Biamino, S., Lombardi, M., & Fino, P. *Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair.* Applied Sciences, 2019, 9(16).

[Sahasrabudhe, 2018-a] Sahasrabudhe, O. S., & Raut, D. *Effect of heat source positioning on hybrid TIG-MAG arc welding process.* Materials Today: Proceedings, 2018, 5(9), 18518–18526.

[Sahasrabudhe, 2018-a] Sahasrabudhe, O. S., & Raut, D. N. *Analytic framework on parameter ranking for hybrid TIG MAG arc welding of mild steel.* Journal of Advanced Research, 2018, 12, 27–37.

[Sames, 2016] Sames, W. J., List, F. A., Pannala, S., Dehoff, R. R., & Babu, S. S. *The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing*. International Materials Reviews, 2016, 61(5), 315–360.

[Satish Prakash, 2018] Satish Prakash, K., Nancharaih, T., & Subba Rao, V. V. *Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing - An Overview.* Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2), 3873–3882.

[SCIAKY, 2021] Sciaky, *Sciaky, powder vs wire*. https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-vs-powder, 2021.

[Scotti, 2012] Scotti, A., Ponomarev, V., & Lucas, W. *A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMAW welding.* Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(6), 1406–1413.

[Scotti, 2014] Scotti, A., Ponomarev, V., & Lucas, W. *Interchangeable metal transfer phenomenon in GMA welding: Features, mechanisms, classification.* Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11), 2488–2496.

[Scotti, 2020] Scotti, F. M., Teixeira, F. R., Silva, L. J. da, de Araújo, D. B., Reis, R. P., & Scotti, A. *Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique.* Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57, 23–35.

[Selvi, 2018] Selvi, S., Vishvaksenan, A., & Rajasekar, E. *Cold metal transfer (CMT) technology - An overview.* Defence Technology, 2018, 14(1), 28–44.

[Shassere, 2019] Shassere, B., Nycz, A., Noakes, M. W., Masuo, C., & Sridharan, N. *Correlation of microstructure and mechanical properties of Metal Big Area Additive Manufacturing.* Applied Sciences, 2019, 9(4).

[Sheoran, 2020] Sheoran, A. J., Kumar, H., Arora, P. K., & Moona, G. *Bio-medical applications of additive manufacturing: A review*. Procedia Manufacturing, 2020, 51, 663–670.

[Shi, 2020] Shi, G., Guan, C., Quan, D., Wu, D., Tang, l., & Gao, T. *An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing*. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(4), 1252–1259.

[Shukla, 2020] Shukla, P., Dash, B., Kiran, D. V., & Bukkapatnam, S. *Arc Behavior in Wire Arc Additive Manufacturing Process.* Procedia Manufacturing, 2020, 48, 725–729.

[Simchi, 2003] Simchi, A., Petzoldt, F., & Pohl, H. *On the development of direct metal laser sintering for rapid tooling*. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 141(3), 319–328.

[Singh, 2019] Singh, R., Gupta, A., Tripathi, O., Srivastava, S., Singh, B., Awasthi, A., … Saxena, K. K. *Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview.* Materials Today: Proceedings, 2019, 26, 3058–3070.

[Singh, 2020] Singh, S. R., & Khanna, P. *Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials.* Materials Today: Proceedings, 2020.

[Somashekara, 2017] Somashekara, M. A., & Suryakumar, S. *Studies on Dissimilar Twin-Wire Weld-Deposition for Additive Manufacturing Applications.* Transactions of the Indian Institute of Metals, 2017, 70(8), 2123–2135.

[Starke, 2010] Starke, E. A., & Staley, J. T. *Application of modern aluminium alloys to aircraft. Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production,* Processing and Applications, 2010, Woodhead Publishing Limited.

[Su, 2019] Su, C., Chen, X., Gao, C., & Wang, Y. *Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Al-Mg alloys fabricated by WAAM.* Applied Surface Science, 2019, 486, 431–440.

[Suárez, 2021] Suárez, A., Aldalur, E., Veiga, F., Artaza, T., Tabernero, I., & Lamikiz, A. *Wire arc additive manufacturing of an aeronautic fitting with different metal alloys: From the design to the part*. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64, 188–197.

[Subramaniam, 1999] Subramaniam, S., White, D. R., Jones, J. E., & Lyons, D. W. *Experimental approach to selection of pulsing parameters in pulsed GMAW.* Welding Journal (Miami, Fla), 1999, 78(5), 166–172.

[Sun, 2021] Sun, C., Wang, Y., McMurtrey, M. D., Jerred, N. D., Liou, F., & Li, J. *Additive manufacturing for energy: A review.* Applied Energy, 2021, 282.

[Tabernero, 2018] Tabernero, I., Paskual, A., Álvarez, P., & Suárez, A. *Study on Arc Welding Processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing.* Procedia CIRP, 2018, 68, 358–362.

[Taşdemir, 2020] Taşdemir, A., & Nohut, S. *An overview of wire arc additive manufacturing (WAAM) in shipbuilding industry*. Ships and Offshore Structures, 2020, 0(0), 1–18.

[Tofail, 2018] Tofail, S. A. M., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. *Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities.* Materials Today, 2018, 21(1), 22–37.

[Udroiu, 2012] Udroiu, R. *Powder Bed Additive Manufacturing Systems and its applications.* Academic Journal of Manufacturing Engineering, 2012, 10(4), 122–129.

[UNE-EN ISO 148-1] Materiales metálicos. Ensayo de flexión por choque con péndulo Charpy. Parte 1: Método de ensayo, UNE-EN ISO 148-1, Abril 2016.

[UNE-EN ISO 6507-1] Normalización Española, Materiales Metálicos. Ensayo de dureza Vickers. Parte 1: Método de ensayo, UNE- EN ISO 6507-1, October 2018.

[UNE-EN ISO 6892- 1] Normalización Española, Materiales Metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente, UNE-EN ISO 6892- 1, February 2017.

[Urhal, 2019] Urhal, P., Weightman, A., Diver, C., & Bartolo, P. *Robot assisted additive manufacturing: A review.* Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 59, 335–345.

[Veiga, 2019] Veiga, F., Del Val, A. G., Suárez, A., & Alonso, U. *Analysis of the machining process of titanium Ti6Al-4V parts manufactured by wire arc additive manufacturing (WAAM).* Materials, 2019, 13(3), 766.

[Veiga, 2021] Veiga, F., Suárez, A., Aldalur, E., Goenaga, I., & Amondarain, J. *Wire arc additive manufacturing process for topologically optimized aeronautical fixtures*. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2021, 0, 0.

[Venturini, 2016] Venturini, G., Montevecchi, F., Scippa, A., & Campatelli, G. *Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features.* Procedia CIRP, 2016, 55, 95–100.

[Vimal, 2020] Vimal, K. E. K., Naveen Srinivas, M., & Rajak, S. *Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: A review*. Materials Today: Proceedings, 2020.

[WAAMMAT, 2021] WAAMMAT, https://waammat.com/, 2021.

[Wang, 2019] Wang, L., Xue, J., & Wang, Q. *Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel.* Materials Science and Engineering A, 2019, 751, 183–190.

[Wang, 2017] Wang, Q., Qi, B., Cong, B., & Yang, M. *Output characteristic and arc length control of pulsed gas metal arc welding process.* Journal of Manufacturing Processes, 2017, 29, 427–437.

[Williams, 2016-a] Williams, S. *WAAM - Current and Future Developments*. In Defence IQ Additive Manufacturing for Aerospace, Defence and Space conference, 2016.

[Williams, 2016-b] Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G., & Colegrove, P. *Wire + Arc additive manufacturing*. Materials Science and Technology, 2016, 32(7), 641–647.

[Wu, 2018-a] Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., & Li, H. *Effects of heat accumulation on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy deposited by wire arc additive manufacturing*. Additive Manufacturing, 2018, 23, 151–160.

[Wu, 2018-b] Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., & Norrish, J. *A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement*." Journal of Manufacturing Processes, 2018, 35, 127–139.

[Wu, 2004] Wu, C. S., Chen, M. A., & Li, S. K. *Analysis of excited droplet oscillation and detachment in active control of metal transfer.* Computational Materials Science, 2004, 31(1–2), 147–154.

[Xia, 2020] Xia, C., Pan, Z., Polden, J., Li, H., Xu, Y., Chen, S., & Zhang, Y. *A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system*. Journal of Manufacturing Systems, 2020, 57, 31–45.

[Xiong, 2018] Xiong, J., Li, Y., Li, R., & Yin, Z. *Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing*. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 252, 128–136.

[Xiong, 2016] Xiong, J., Yin, Z., & Zhang, W. *Closed-loop control of variable layer width for thin-walled parts in wire and arc additive manufacturing.* Journal of Materials Processing Technology, 2016, 233, 100–106.

[Xiong, 2013] Xiong, J., & Zhang, G. *Online measurement of bead geometry in GMAW-based additive manufacturing using passive vision.* Measurement Science and Technology, 2013, 24(11).

[Xu, 2019] Xu, X., Ding, J., Ganguly, S., Diao, C., & Williams, S. *Preliminary Investigation of Building Strategies of Maraging Steel Bulk Material Using Wire + Arc Additive Manufacture*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(2), 594–600.

[Ya, 2018] Ya, W., & Hamilton, K. *On-Demand Spare Parts for the Marine Industry with Directed Energy Deposition: Propeller Use Case.* Industrializing Additive Manufacturing-Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications - AMPA2017, 2018, 4.

[Yang, 2016] Yang, D., He, C., & Zhang, G. *Forming characteristics of thin-wall steel parts by double electrode GMAW based additive manufacturing.* Journal of Materials Processing Technology, 2016, 227, 153–160.

[Yang, 2017] Yang, D., Wang, G., & Zhang, G. *Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography.* Journal of Materials Processing Technology, 2017, 244, 215–224.

[Yao, 2016] Yao, P., Xue, J., Zhou, K., Wang, X., & Zhu, Q. *Symmetrical transition waveform control on double-wire MIG welding.* Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229, 111–120.

[Yili, 2018] Yili, D., Shengfu, Y., Yusheng, S., Tianying, H., & Lichao, Z. *Wire and arc additive manufacture of high-building multi-directional pipe joint.* International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018 96(5–8), 2389–2396.

[Zhang, 2019] Zhang, B., Zhang, L., Wang, C., Wang, Z., & Gao, Q. *Microstructure and properties of Al alloy ER5183 deposited by variable polarity cold metal transfer.* Journal of Materials Processing Technology, 2019, 267, 167–176.

[Zhang, 2018-a] Zhang, C., Li, Y., Gao, M., & Zeng, X. *Wire arc additive manufacturing of Al-6Mg alloy using variable polarity cold metal transfer arc as power source.* Materials Science and Engineering A, 2018, 711, 415–423.

[Zhang, 2020-a] Zhang, G., Xiong, H., Yu, H., Qin, R., Liu, W., & Yuan, H. *Microstructure evolution and mechanical properties of wire-feed electron beam additive manufactured Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr alloy with different subtransus heat treatments*. Materials and Design, 2020, 195(8), 109063.

[Zhang, 2020-b] Zhang, P., Li, G., Yan, H., & Tian, Y. *Effect of positive/negative electrode ratio on cold metal transfer welding of 6061 aluminum alloy.* International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(3–4), 1453–1464.

[Zhang, 2020-c] Zhang, X., Wu, X., & Shi, J. *Additive manufacturing of zirconia ceramics: a state-of-the-art review*. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(4), 9029–9048.

[Zhang, 2003] Zhang, Y. M., Chen, Y., Li, P., & Male, A. T. *Weld deposition-based rapid prototyping: A preliminary study.* Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135(2-3 SPEC.), 347–357.

[Zhang, 2002] Zhang, Y. M., Li, P., Chen, Y., & Male, A. T. *Automated system for welding-based rapid prototyping.* Mechatronics, 2002 12(1), 37–53.

[Zhang, 2018-b] Zhang, Y., Wu, L., Guo, X., Kane, S., Deng, Y., Jung, Y. G., … Zhang, J. *Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review.* Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(1), 1–13.

[Zheng, 2021] Zheng, H., Qi, B., & Yang, M. (2021). *Dynamic analysis of the ultrasonic-frequency pulsed GMAW metal transfer process.* Journal of Manufacturing Processes, 62(December 2020), 283–290.

[Zhu, 2021] Zhu, J., Zhou, H., Wang, C., Zhou, L., Yuan, S., & Zhang, W. *A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges.* Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(1), 91–110.