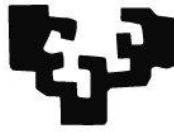


eman ta zabal zazu



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 Tecnalía. Amaia Alberdi, Mikel Ortiz, Pedro Ramiro, Antonio Rubio, Jon Borha Fernández, Txomin Ostra, Germán Rodríguez, 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 Tecnalía 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 (<i>Power Bed Fusion, PBF</i>)	II-5
2.2 Binder Jetting (BJ).....	II-7
2.3 Sheet Lamination (SL).....	II-8
2.4 Deposición de energía dirigida (<i>Directed Energy Deposition, DED</i>)	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 transferencia 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 (<i>Heat input, HI</i>).....	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 (<i>Heat input, HI</i>).....	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

<i>Figura I-1. Concepto de Industria 4.0 aplicada a la fabricación aditiva [INTEGRADDE, 2021].....</i>	<i>I-2</i>
<i>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>	<i>I-3</i>
<i>Figura I-3. A nivel mundial, desarrolladores de la fabricación aditiva WAAM, distribuidos por tecnologías y materiales</i>	<i>I-4</i>
<i>Figura I-4. Antecedentes y evolución de los proyectos asociados a esta tesis</i>	<i>I-5</i>
<i>Figura II-1. Representación esquemática de las tecnologías de fabricación de lecho de polvo (PBF).....</i>	<i>II-6</i>
<i>Figura II-2. Representación esquemática del proceso Binder Jetting (adaptado de [Pragana, 2021]).....</i>	<i>II-8</i>
<i>Figura II-3. Representación esquemática del proceso Sheet Lamination (adaptado de [Pragana, 2021]).....</i>	<i>II-9</i>
<i>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]).....</i>	<i>II-11</i>
<i>Figura II-5. Representación gráfica del proceso GMAW (adaptado de [Hu, 2021]).....</i>	<i>II-21</i>
<i>Figura II-6. Principales procesos de transferencia de material.....</i>	<i>II-21</i>
<i>Figura II-7. Proceso y forma de la señal de intensidad y tensión en el modo de trabajo Cold Arc (adaptado de [EWM, 2021]).....</i>	<i>II-24</i>
<i>Figura II-8. Fases principales del control de alimentación de hilo en el proceso CMT [Prado-Cerqueira, 2017].....</i>	<i>II-24</i>
<i>Figura II-9. Proceso y forma de la señal de intensidad en el modo de trabajo AC pulsado [EWM, 2021].....</i>	<i>II-26</i>
<i>Figura II-10. Tecnología de dos electrodos GMAW tándem [Yao, 2016]</i>	<i>II-31</i>
<i>Figura II-11. Proceso híbrido GMAW/GTAW introduciendo la antorcha GTAW en bypass (adaptado de [Yang, 2016])</i>	<i>II-32</i>
<i>Figura II-12. Representación gráfica del proceso GMAW-HW (adaptado de [Günther, 2018-a]).....</i>	<i>II-33</i>
<i>Figura II-13. (a) Puente fabricado por la compañía MX3D en acero inoxidable [MX3D, 2021], (b) Pieza con cavidades internas fabricada en acero [Lincoln</i>	

<i>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].....</i>	<i>II-37</i>
<i>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]</i>	<i>II-40</i>
<i>Figura II-15. Máquina ADDILAN v.0.1 [ADDILAN, 2021].....</i>	<i>II-42</i>
<i>Figura II-16. Máquina WAAM GTArc603 [GEFERTEC, 2021].....</i>	<i>II-42</i>
<i>Figura II-17. Máquina ARCEMY para fabricación WAAM basado en GMAW [AML3D, 2021]</i>	<i>II-43</i>
<i>Figura II-18. Máquina RAMLAB durante la fabricación de una hélice de barco para el grupo Damen Shipyard [RAMLAB, 2021].....</i>	<i>II-43</i>
<i>Figura II-19. Solución basada en un robot antropomórfico de la empresa Lincoln Electric [Lincoln Electric Additive, 2021].....</i>	<i>II-44</i>
<i>Figura II-20. Ejemplos de aplicaciones de MX3D en el sector de la construcción [MX3D, 2021]</i>	<i>II-44</i>
<i>Figura II-21. Célula robótica de WAAM basado en GMAW con 2 robots trabajando en paralelo, para aumentar la productividad [WAAMMAT, 2021]</i>	<i>II-45</i>
<i>Figura II-22. Sistemas de monitorización y control para WAAM (adaptado de [Xia, 2020]).....</i>	<i>II-47</i>
<i>Figura II-23. Diagrama esquemático de un sistema de control basado en cámaras CCD para el proceso WAAM [Xiong, 2016].....</i>	<i>II-48</i>
<i>Figura II-24. Rediseño de un brazo robótico mediante optimización topológica [MX3D, 2021]</i>	<i>II-50</i>
<i>Figura II-25. Concepto del sistema WAAM integral (adaptado de [Wu, 2018-b])</i>	<i>II-52</i>
<i>Figura III-1. Set-up del sistema con representación detallada de la antorcha de soldadura.....</i>	<i>III-2</i>
<i>Figura III-2. Posición de escaneo del robot.....</i>	<i>III-3</i>

<i>Figura III-3. Esquema del protocolo de comunicación utilizado para el sistema robótico desarrollado.....</i>	<i>III-4</i>
<i>Figura III-4. Definición del Stick-out, de la longitud del arco y de la anchura del arco</i>	<i>III-7</i>
<i>Figura III-5. Señal de intensidad para el modo GMAW a) estándar y b) pulsado en aceros con gas de protección 20% CO₂ - 80% Ar, diámetro de hilo de 1,2 mm (Job 9) y valores de velocidad de alimentación de hilo de 5 m/min.....</i>	<i>III-9</i>
<i>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% CO₂ - 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..</i>	<i>III-10</i>
<i>Figura III-7. Señal de intensidad real para el modo de trabajo GMAW pulsado en aceros con gas de protección 20% CO₂ - 80% Ar, diámetro de hilo de 1,2 mm (Job 9) y velocidad de alimentación de hilo de 8 m/min</i>	<i>III-11</i>
<i>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</i>	<i>III-11</i>
<i>Figura III-9. Señal de intensidad para el modo Cold Arc en aceros con gas de protección 20% CO₂ - 80% Ar, diámetro de hilo de 1,2 mm (Job 194) y velocidad de alimentación de hilo de 5 m/min</i>	<i>III-12</i>
<i>Figura III-10. Señal de intensidad para el modo Force Arc a) estándar; b) pulsado en aceros con gas de protección 20% CO₂ - 80% Ar, diámetro de hilo de 1,2 mm (Job 180) y velocidad de alimentación de hilo de 5 m/min</i>	<i>III-13</i>
<i>Figura III-11. Señales de intensidad de la fabricación de cordones con WFR=8 m/min y diferentes Stick-outs</i>	<i>III-15</i>
<i>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.....</i>	<i>III-16</i>
<i>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</i>	<i>III-16</i>
<i>Figura III-14. Durante la fabricación de las 5 paredes la ondulación del sustrato</i>	<i>III-17</i>
<i>Figura III-15. Parte de la señal de intensidad adquirida durante la fabricación de la capa 23 de las 5 paredes solapadas triples.....</i>	<i>III-17</i>
<i>Figura III-16. Valores medios de (a) velocidad de alimentación de hilo y (b) intensidad del 60% central del cordón aportado por capa.....</i>	<i>III-18</i>

<i>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.....</i>	<i>III-20</i>
<i>Figura III-18. Recta teórica del Job 9 y los valores reales de intensidad media en cordones únicos fabricados con este Job.....</i>	<i>III-20</i>
<i>Figura III-19. Diagrama del control de altura</i>	<i>III-21</i>
<i>Figura III-20. (a) WFR, (b) intensidad y (c) altura del robot monitorizados durante la fabricación del vaso de validación.....</i>	<i>III-23</i>
<i>Figura III-21. Vaso fabricado para la validación del control de altura.....</i>	<i>III-23</i>
<i>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.....</i>	<i>IV-6</i>
<i>Figura IV-2. (a) Trayectoria de la estrategia solapada; (b) Trayectoria de la estrategia oscilada</i>	<i>IV-9</i>
<i>Figura IV-3. Intensidad y tensión media durante la fabricación de cada capa en las dos estrategias de fabricación</i>	<i>IV-10</i>
<i>Figura IV-4. Macrografía de un cordón con los puntos de medición de durezas y observación de la microestructura señalados</i>	<i>IV-10</i>
<i>Figura IV-5. Macrografía de la pared con los puntos de medición de durezas y observación de la microestructura señalados</i>	<i>IV-11</i>
<i>Figura IV-6. Distribución de probetas para el análisis de las propiedades mecánicas en la pared oscilada y solapada.....</i>	<i>IV-12</i>
<i>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</i>	<i>IV-13</i>
<i>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</i>	<i>IV-15</i>
<i>Figura IV-9. Macrografía de la pared simple y detalle del primer cordón aportado.....</i>	<i>IV-21</i>
<i>Figura IV-10. Microestructuras obtenidas en los puntos de la pared simple señalados en la Figura IV-5.....</i>	<i>IV-22</i>

- 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 controlIV-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 mínimosIV-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 rojoIV-32*
- Figura IV-19. Energía suministrada durante la fabricación de la pared (a) solapada y (b) osciladaIV-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 macrografíasIV-40*
- Figura IV-23. (izquierda) Macroestructura de las partes superior e inferior de la pared oscilada en dirección transversal (plano XZ); (derecha) Microestructura*

<i>de la pared oscilada. Tenga en cuenta que las micrografías se sacan en las áreas marcadas con los recuadros rojos en las macrografías</i>	<i>IV-42</i>
<i>Figura IV-24. Curvas tensión-deformación de las probetas de las paredes oscilada y solapada (a) horizontales y (b) verticales</i>	<i>IV-45</i>
<i>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</i>	<i>IV-48</i>
<i>Figura IV-26. Cálculo del área transversal efectiva de la pared fabricada mediante estrategia (a) oscilada y (b) solapada.....</i>	<i>IV-49</i>
<i>Figura IV-27. Cálculo del área transversal efectiva de las paredes fabricadas con diferentes estrategias según la altura y la anchura efectivas</i>	<i>IV-50</i>
<i>Figura IV-28. Diseño del molde con las dimensiones principales en mm.....</i>	<i>IV-51</i>
<i>Figura IV-29. Molde de paredes delgadas fabricado en acero ER70S-6</i>	<i>IV-52</i>
<i>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.....</i>	<i>IV-53</i>
<i>Figura IV-31. Puntos medidos de la superficie exterior de la pieza (puntos negros) y la forma teórica del molde</i>	<i>IV-54</i>
<i>Figura IV-32. a) Diseño original de la pieza con álabes, b) montaje de la pieza con álabes (pieza en cuestión en rosa).....</i>	<i>IV-55</i>
<i>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.....</i>	<i>IV-56</i>
<i>Figura IV-34. Trayectorias generadas para la fabricación de la pieza de validación con alabes</i>	<i>IV-56</i>
<i>Figura IV-35. Trayectorias de la parte media: (izq.) Trayectorias de las capas pares; (dcha.) Trayectorias de las capas impares.....</i>	<i>IV-58</i>
<i>Figura IV-36. Pieza con álabes fabricada y mecanizada.....</i>	<i>IV-59</i>
<i>Figura IV-37. Exceso de calor durante la fabricación de la pieza con sustrato de grosor de 10 mm</i>	<i>IV-59</i>
<i>Figura V-1. (izq.) Distribución de probetas en la pared solapada; (dcha.) Pared fabricada.....</i>	<i>V-5</i>
<i>Figura V-2. Señal de intensidad con WFR=8 m/min: a) GMAW pulsado, b) Cold Arc, c) AC pulsado</i>	<i>V-6</i>

<i>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.....</i>	<i>V-7</i>
<i>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</i>	<i>V-9</i>
<i>Figura V-5. Macrográficas de las paredes (a) GMAW pulsado, (b) Cold Arc y (c) AC pulsado. (a.1) Macrografía tratada para determinar los bordes de las paredes</i>	<i>V-15</i>
<i>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</i>	<i>V-16</i>
<i>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 ..</i>	<i>V-18</i>
<i>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</i>	<i>V-19</i>
<i>Figura V-9. Micrográficas 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</i>	<i>V-20</i>
<i>Figura V-10. Valores de porosidad media obtenidas con los modos de trabajo GMAW pulsado, Cold Arc y AC pulsado</i>	<i>V-21</i>
<i>Figura V-11. Microestructura de la pared solapada en diferentes planos XZ, YZ y XY a diferentes aumentos (x50, x200)</i>	<i>V-22</i>
<i>Figura V-12. Diseño de la pieza a fabricar en fibra de carbono mediante el molde de aluminio</i>	<i>V-24</i>
<i>Figura V-13. Diseño del molde, cotas en mm.....</i>	<i>V-25</i>
<i>Figura V-14. Trayectorias y secuencia de aporte del molde</i>	<i>V-25</i>
<i>Figura V-15. (izq.) Molde de aluminio tal y como se obtiene de la fabricación mediante WAAM y (dcha.) tras el mecanizado final.....</i>	<i>V-27</i>
<i>Figura V-16. Proceso de diseño y fabricación de las torretas</i>	<i>V-29</i>

<i>Figura V-17. Trayectorias de aporte de dos capas consecutivas de la torreta de aluminio.....</i>	<i>V-31</i>
<i>Figura V-18. Cuatro torretas fabricadas matricialmente</i>	<i>V-31</i>
<i>Figura VI-1. Representación de la antorcha del sistema robótico desarrollado en esta tesis con la incorporación del HW</i>	<i>VI-5</i>

Índice de tablas

<i>Tabla II-1. Características principales de las tecnologías SLM y EBM.....</i>	<i>II-7</i>
<i>Tabla II-2. Comparativa de los procesos de fabricación aditiva metálica</i>	<i>II-13</i>
<i>Tabla II-3. Resumen de la nomenclatura utilizada para la definición de las diferentes paredes fabricadas mediante diferentes estrategias</i>	<i>II-29</i>
<i>Tabla II-4. Comparativa de las propiedades mecánicas obtenidas en acero dulce ER70S-6 por diversos autores con estrategias de aporte diferentes... </i>	<i>II-36</i>
<i>Tabla II-5. Propiedades mecánicas del aluminio 5356 fabricado mediante WAAM utilizando como gas de protección el argón o el nitrógeno de alta pureza</i>	<i>II-39</i>
<i>Tabla III-1. Parámetros principales del proceso WAAM basado en GMAW sinérgico.....</i>	<i>III-5</i>
<i>Tabla III-2. Principales modos de trabajo para aceros disponibles en la fuente de soldadura Titan XQ 400 AC puls (EWM).....</i>	<i>III-14</i>
<i>Tabla IV-1. Composición química del hilo de acero ER70S-6 en peso (%)....</i>	<i>IV-1</i>
<i>Tabla IV-2. Parámetros de los cordones fabricados para ver la influencia de la velocidad de alimentación de hilo.....</i>	<i>IV-3</i>
<i>Tabla IV-3. Parámetros de fabricación de los cordones para ver la microestructura, la dilución y la penetración con cada modo de trabajo</i>	<i>IV-4</i>
<i>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 ER70IV-5</i>	
<i>Tabla IV-5. Resultados medidos y calculados para la definición de la geometría de los cordones.....</i>	<i>IV-7</i>
<i>Tabla IV-6. Parámetros de fabricación de la pared solapada y oscilada.....</i>	<i>IV-9</i>
<i>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</i>	<i>IV-14</i>
<i>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</i>	<i>IV-17</i>
<i>Tabla IV-9. Micrografías del cordón 3.1 en cinco puntos definidos en la Figura IV-4 y las durezas correspondientes a estos puntos.....</i>	<i>IV-19</i>
<i>Tabla IV-10. Parámetros relacionados con crecimiento por capa en las dos paredes</i>	<i>IV-31</i>

<i>Tabla IV-11. Parámetros relacionados con el suministro térmico en las dos paredes.....</i>	<i>IV-34</i>
<i>Tabla IV-12. Tiempos de fabricación.....</i>	<i>IV-37</i>
<i>Tabla IV-13. Valores de dureza para las paredes fabricadas.....</i>	<i>IV-43</i>
<i>Tabla IV-14. Estudio de la evolución de la dureza en la dirección transversal en las dos paredes fabricadas.....</i>	<i>IV-43</i>
<i>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.....</i>	<i>IV-46</i>
<i>Tabla IV-16. Parámetros utilizados para la fabricación del molde de paredes delgadas.....</i>	<i>IV-52</i>
<i>Tabla IV-17. Parámetros de fabricación de la pieza de validación con alabes.</i>	<i>IV-58</i>
<i>Tabla V-1. Composición química del hilo Al5356 en peso (%).....</i>	<i>V-2</i>
<i>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</i>	<i>V-3</i>
<i>Tabla V-3. Parámetros de fabricación de la pared solapada.....</i>	<i>V-4</i>
<i>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.....</i>	<i>V-8</i>
<i>Tabla V-5. Secciones transversales de los cordones fabricados con WFR = 4 m/min en los tres modos de trabajo.....</i>	<i>V-10</i>
<i>Tabla V-6. Secciones transversales de los cordones fabricados con WFR = 8 m/min en los tres modos de trabajo.....</i>	<i>V-11</i>
<i>Tabla V-7. Anchura, altura y penetración de los cordones fabricados con los tres modos de trabajo.....</i>	<i>V-12</i>
<i>Tabla V-8. Resultados de los valores de dureza de la pared solapada.....</i>	<i>V-23</i>
<i>Tabla V-9. Valores obtenidos del ensayo de tracción y ensayo de resiliencia de la pared solapada de aluminio 5356.....</i>	<i>V-23</i>
<i>Tabla V-10. Parámetros de fabricación del molde de aluminio 5356.....</i>	<i>V-27</i>
<i>Tabla V-11 Comparación de los pesos del diseño original, el rediseño optimizado topológicamente para AM y los rediseños optimizados topológicamente para WAAM.....</i>	<i>V-29</i>

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

Acrónimos

FA	Fabricación aditiva
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Diseño asistido por ordenador (<i>Computer-Aided Design</i>)
PBF	Tecnologías de lecho de polvo (<i>Power Bed Fusion</i>)
DED	Deposición de energía dirigida (<i>Directed Energy Deposition</i>)
BJ	Binder Jetting
SL	Sheet Lamination
ME	Material Extrusion
MJ	Material Jetting
VP	Estereolitografía (<i>Vat Photopolymerization</i>)
SLM	Fusión selectiva por láser (<i>Selective Laser Melting</i>)
EBM	Fusión por haz de electrones (<i>Electron Beam Melting</i>)
DMLS	Sinterización directa por láser de metales (<i>Directed Metal Laser Sintering</i>)
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 (<i>Wire Feed Rate</i>)
TS	Velocidad de avance (<i>Travel Speed</i>)
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
PAW	Plasma Arc Welding
CMT	Cold Metal Transfer
HW	Hilo caliente (<i>Hot Wire</i>)

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

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.

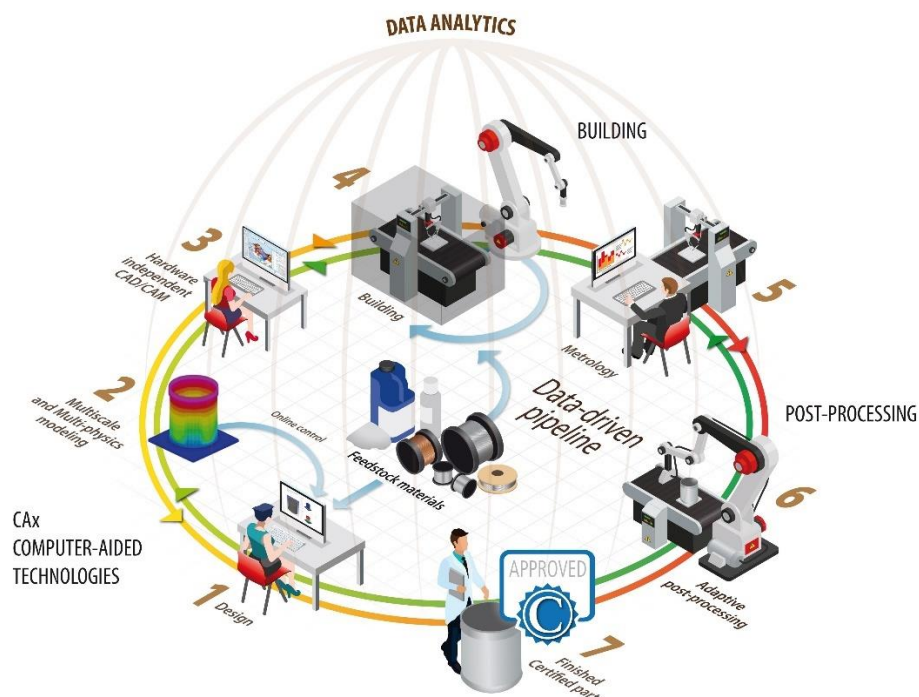


Figura I-1. Concepto de Industria 4.0 aplicada a la fabricación aditiva [INTEGRADDE, 2021]

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].

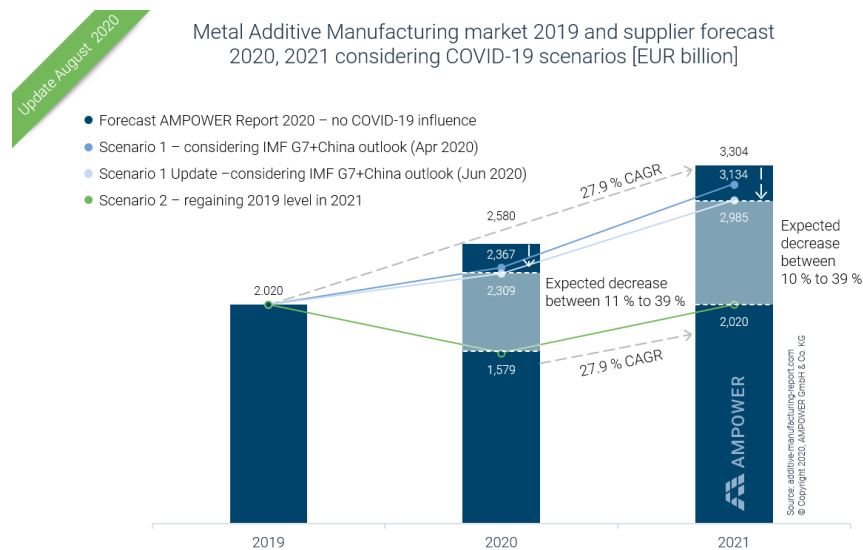


Figura I-2. Evolución prevista del mercado de la fabricación aditiva metálica con diferentes escenarios causados por la pandemia mundial Covid-19 [AMPOWER, 2020]

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.

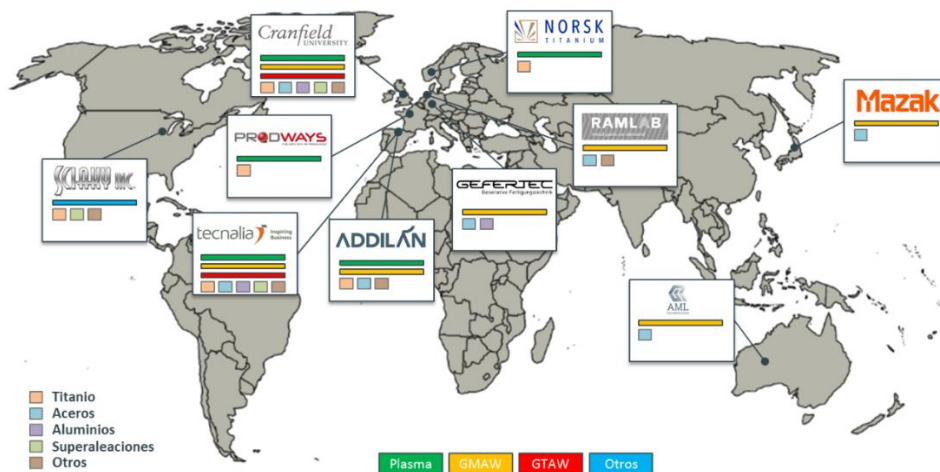


Figura I-3. A nivel mundial, desarrolladores de la fabricación aditiva WAAM, distribuidos por tecnologías y materiales

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.

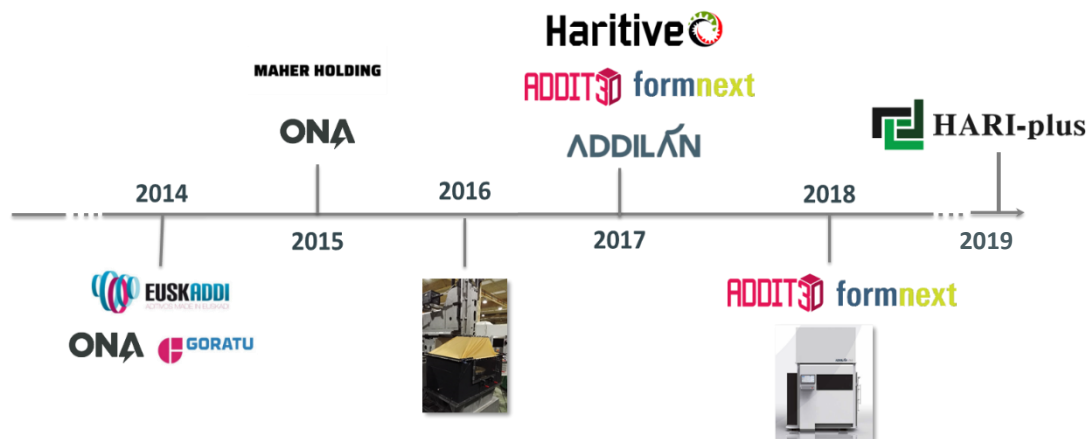


Figura I-4. Antecedentes y evolución de los proyectos asociados a esta tesis

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 transferencia 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 geoméricamente 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 término *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.

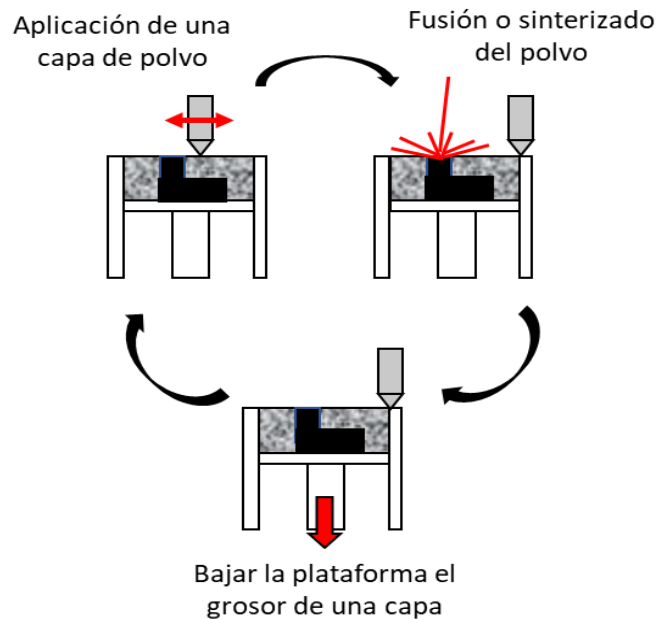


Figura II-1. Representación esquemática de las tecnologías de fabricación de lecho de polvo (PBF)

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 geoméricamente 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 geoméricamente 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 cm³/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
Pre calentamiento de polvo	Pre calentamiento 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 (cm³/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].

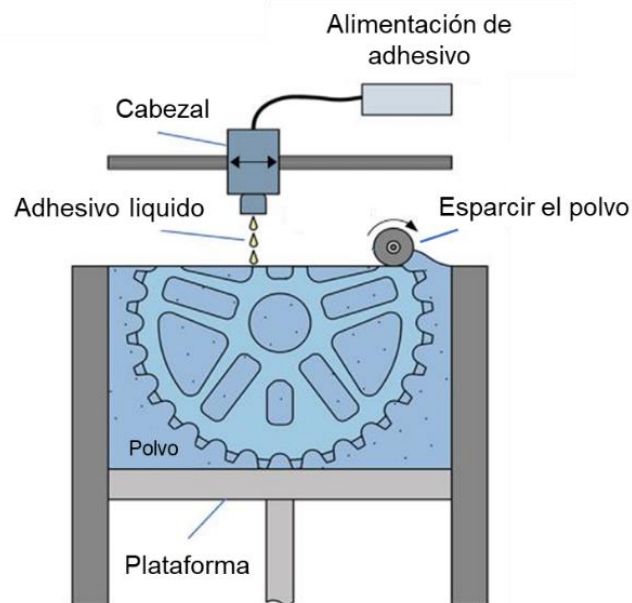


Figura II-2. Representación esquemática del proceso Binder Jetting (adaptado de [Pragana, 2021])

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.

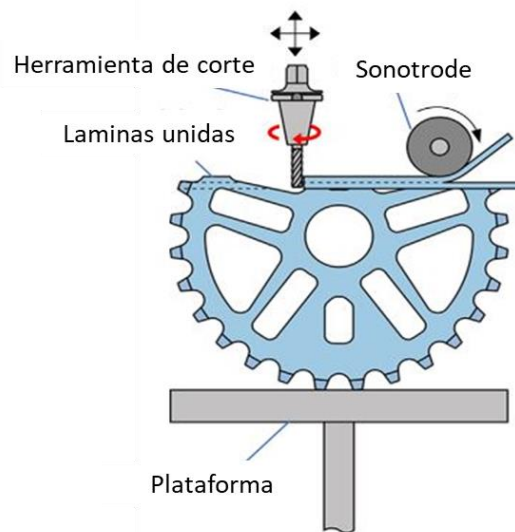


Figura II-3. Representación esquemática del proceso Sheet Lamination (adaptado de [Pragana, 2021])

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 eléctrico 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].

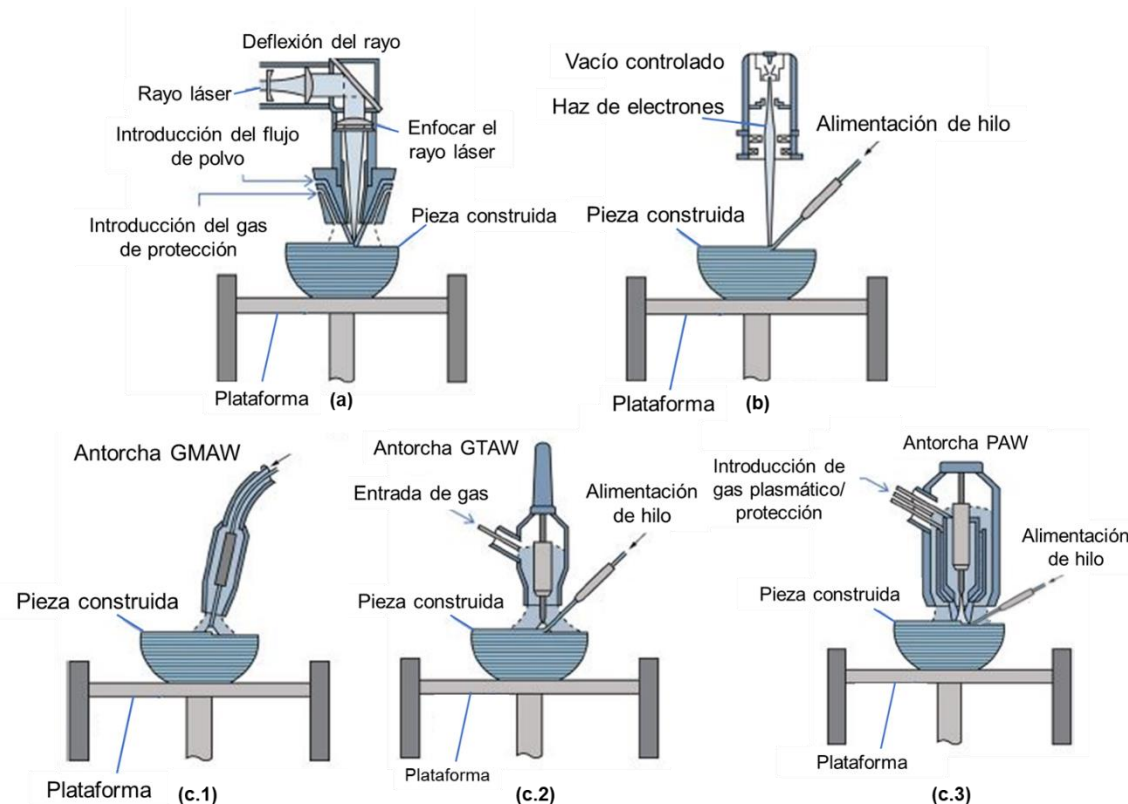


Figura II-4. Representación esquemática de las tecnologías DED: a) Tecnología LMD; b) Tecnología EBAM; c) Tecnología WAAM. c.1) Tecnología WAAM basado en GMAW; c.2) Tecnología WAAM basado en GTAW; c.3) Tecnología WAAM basado en PAW (adaptado de [Pragana, 2021])

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 CO₂ 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 [SCI AKY, 2021]	DED-WAAM [Tabernero, 2018], [Chen, 2015]
Precisión	Alta: $\pm 0,05-0,2$ mm	Media: $\pm 0,2$ 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: $\sim 0,1-0,2$ kg/h	Media: $\sim 0,5-1$ kg/h	Alta: $\sim 3-11$ kg/h	Alta: ~ 10 kg/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 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 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 transferencia 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 altas 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 6Al-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 [SCIKEY, 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 $Ra=500 \mu m$ [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*).

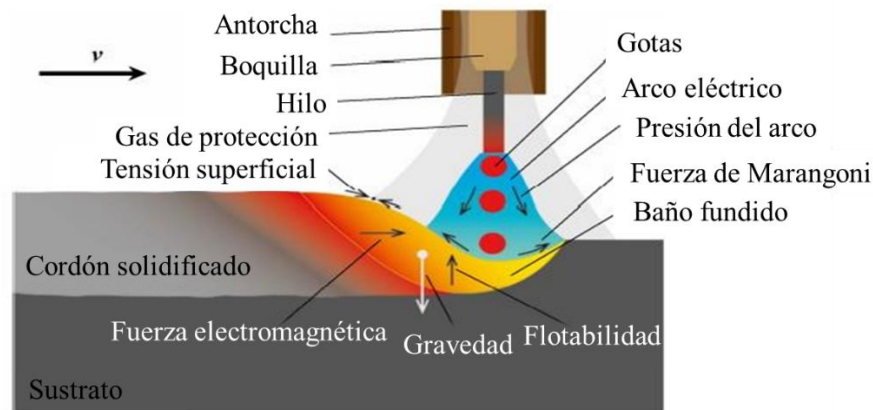


Figura II-5. Representación gráfica del proceso GMAW (adaptado de [Hu, 2021])

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 transferencia 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 transferencia 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 transferencia de material.

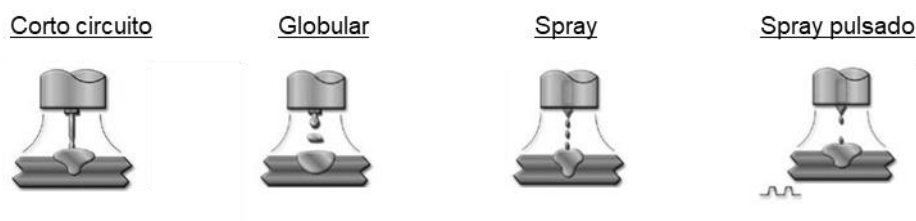


Figura II-6. Principales procesos de transferencia de material

Por ejemplo, el proceso de transferencia 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 transferencia 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 transferencia 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 transferencia en spray pulsado es una variante de la transferencia en spray altamente controlado. Para conseguir este tipo de transferencias, 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 transferencia 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 transferencia 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].

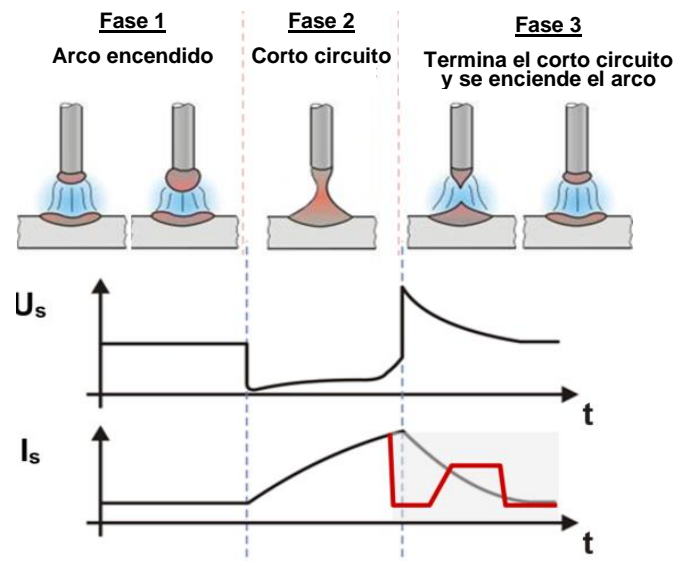


Figura II-7. Proceso y forma de la señal de intensidad y tensión en el modo de trabajo Cold Arc (adaptado de [EWM, 2021])

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 transferencia 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.

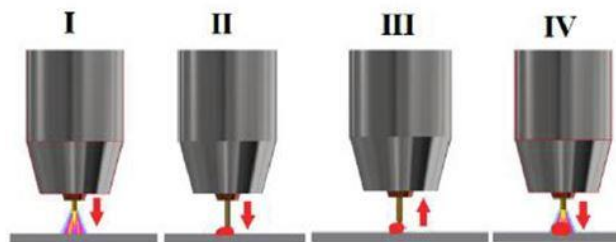


Figura II-8. Fases principales del control de alimentación de hilo en el proceso CMT [Prado-Cerqueira, 2017]

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 [Taberner, 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.

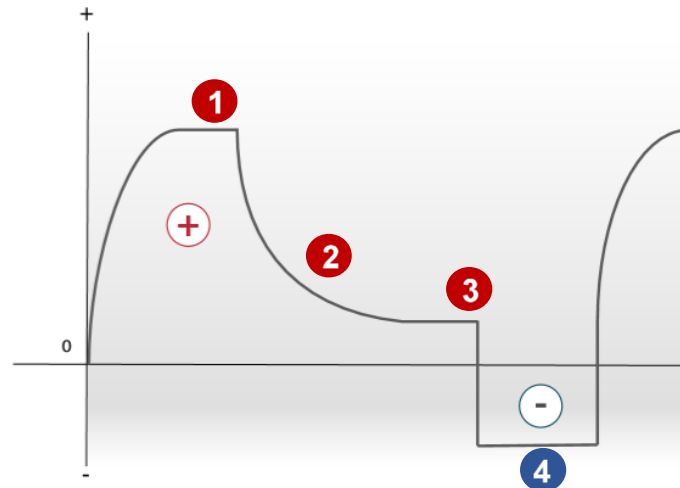


Figura II-9. Proceso y forma de la señal de intensidad en el modo de trabajo AC pulsado [EWM, 2021]

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 [Taberero, 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.


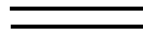


Una vez determinados estos parámetros, se elegirá el modo de trabajo deseado (resumidos en el apartado 4.1) y se establecerá la velocidad de alimentación de hilo (WFR). Dependiendo de estos dos valores la fuente de soldadura crea señales de intensidad con una forma de onda concreta que se introducen 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 uno 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.

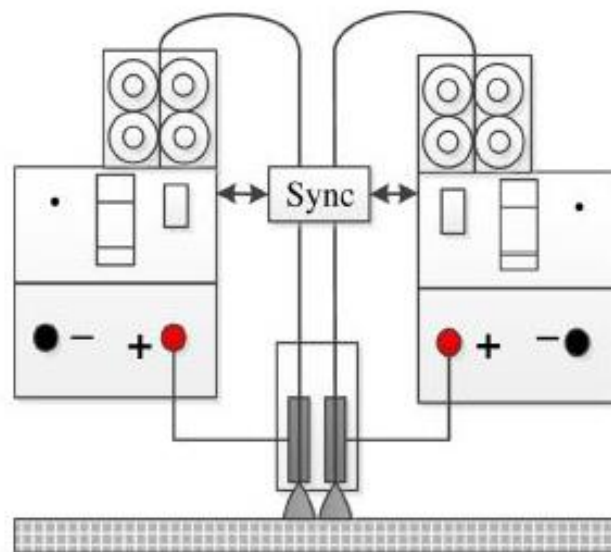


Figura II-10. Tecnología de dos electrodos GMAW tándem [Yao, 2016]

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 transferencia 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 híbrida donde se añade una nueva antorcha GTAW con su propia fuente de soldadura para obtener una distribución del arco eléctrico óptimo [Chen, 2017].

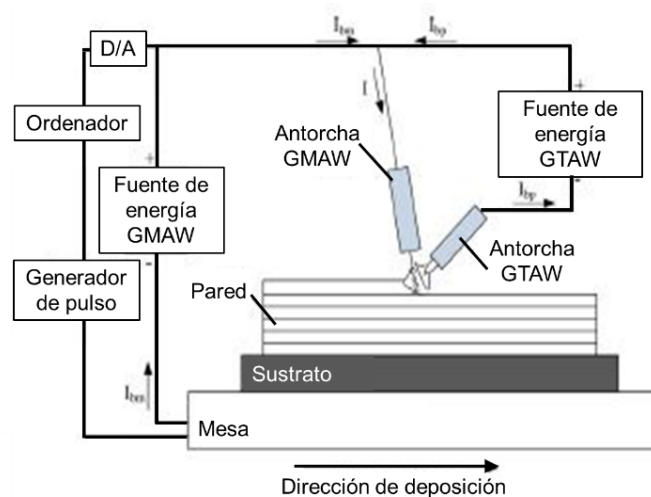


Figura II-11. Proceso híbrido GMAW/GTAW introduciendo la antorcha GTAW en *bypass* (adaptado de [Yang, 2016])

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.

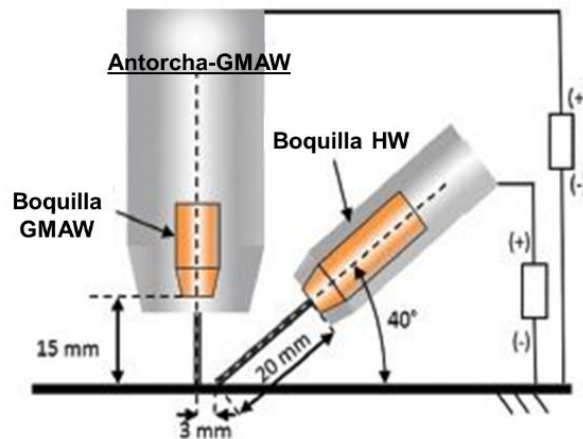


Figura II-12. Representación gráfica del proceso GMAW-HW (adaptado de [Günther, 2018-a])

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 altas 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], inoxidable [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 transformaciones 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 templeabilidad 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 °C y 650 °C 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 °C y 650 °C 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 °C dentro de los granos de austenita.
4. Se forma una estructura de listones con una subestructura de dislocaciones significativa por debajo de 500 °C; esta estructura es bainítica cuando las velocidades de enfriamiento son rápidas ($> 50 \text{ }^\circ\text{C} / \text{s}$).
5. En aceros de alta aleación, en enfriamientos rápidos por debajo de 400 °C 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.

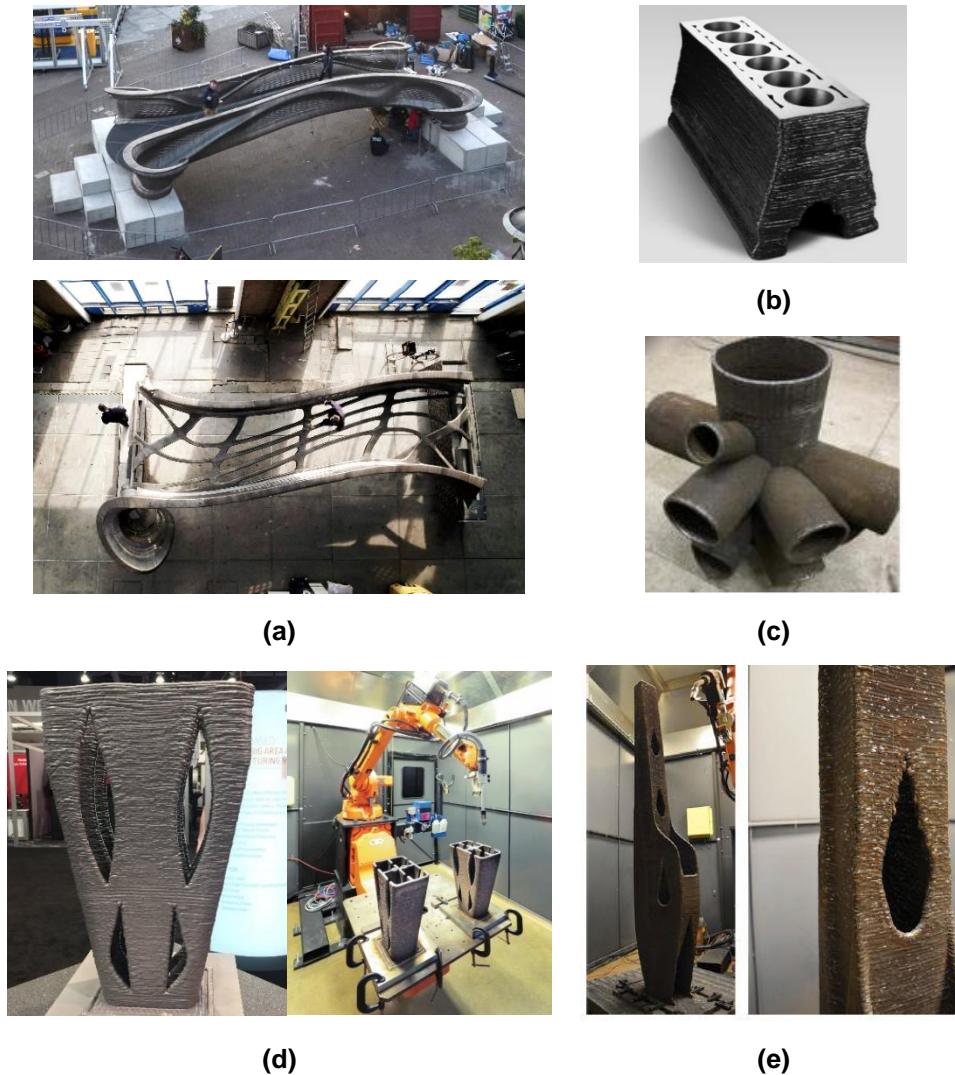


Figura II-13. (a) Puente fabricado por la compañía MX3D en acero inoxidable [MX3D, 2021], (b) Pieza con cavidades internas fabricada en acero [Lincoln Electric Additive, 2021], (c) Conector de 10 tubos multidireccional fabricado en hilo YHJ507M [Yili, 2018], (d) Pieza con cavidades internas fabricada 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 m³ con un peso máximo de 3000 kg y los de 5 ejes piezas de más de 0,8 m³ 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 alargar 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.

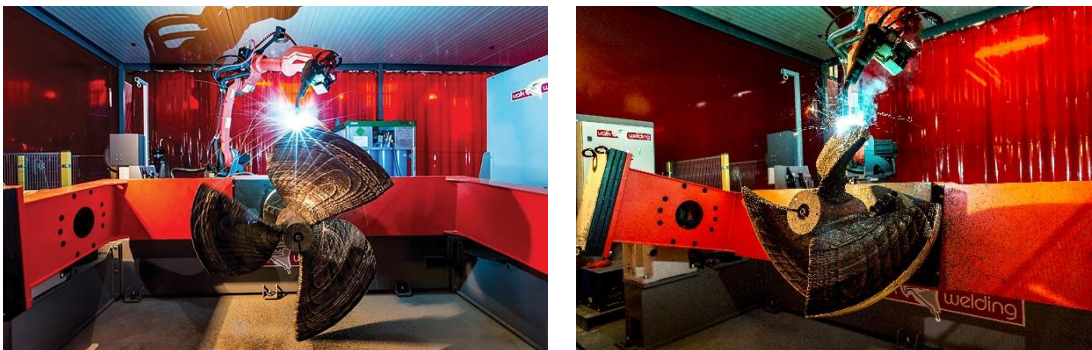


Figura II-18. Máquina RAMLAB durante la fabricación de una hélice de barco para el grupo Damen Shipyards [RAMLAB, 2021]

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.

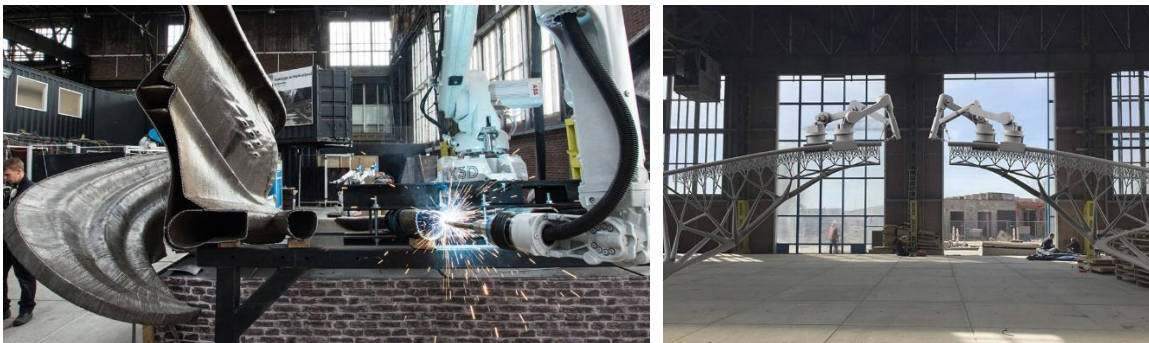


Figura II-20. Ejemplos de aplicaciones de MX3D en el sector de la construcción [MX3D, 2021]

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 frío [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 sería 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.

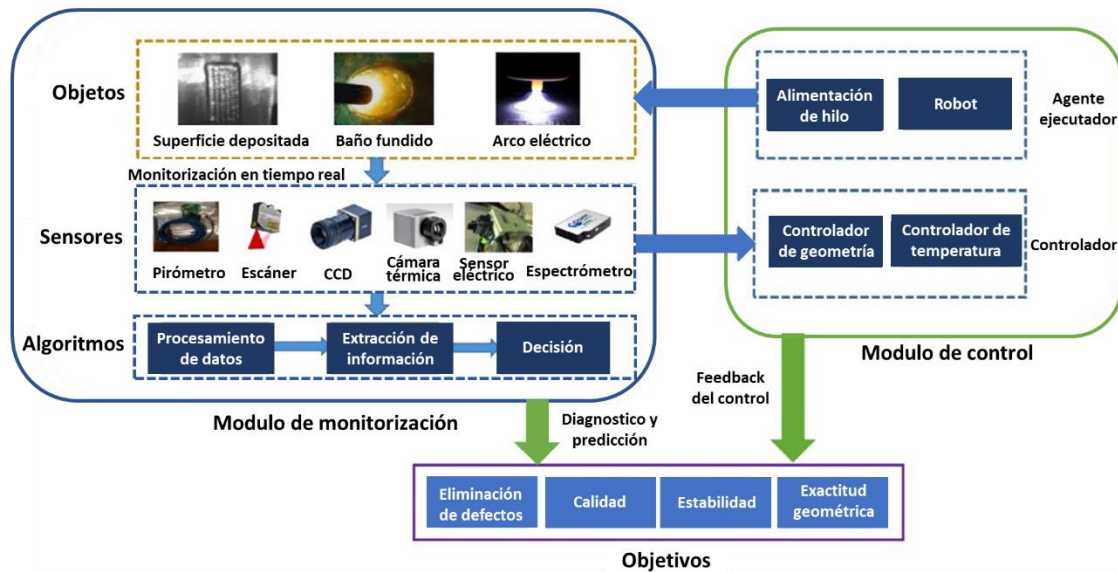


Figura II-22. Sistemas de monitorización y control para WAAM (adaptado de [Xia, 2020])

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 transversal 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.

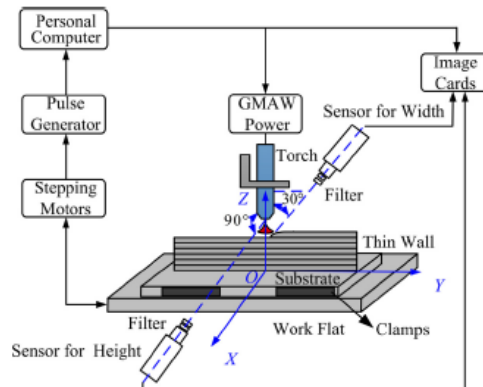


Figura II-23. Diagrama esquemático de un sistema de control basado en cámaras CCD para el proceso WAAM [Xiong, 2016]

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. [Hausser, 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.

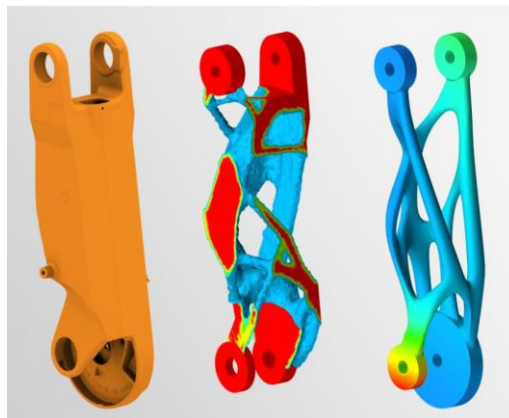


Figura II-24. Rediseño de un brazo robótico mediante optimización topológica [MX3D, 2021]

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.

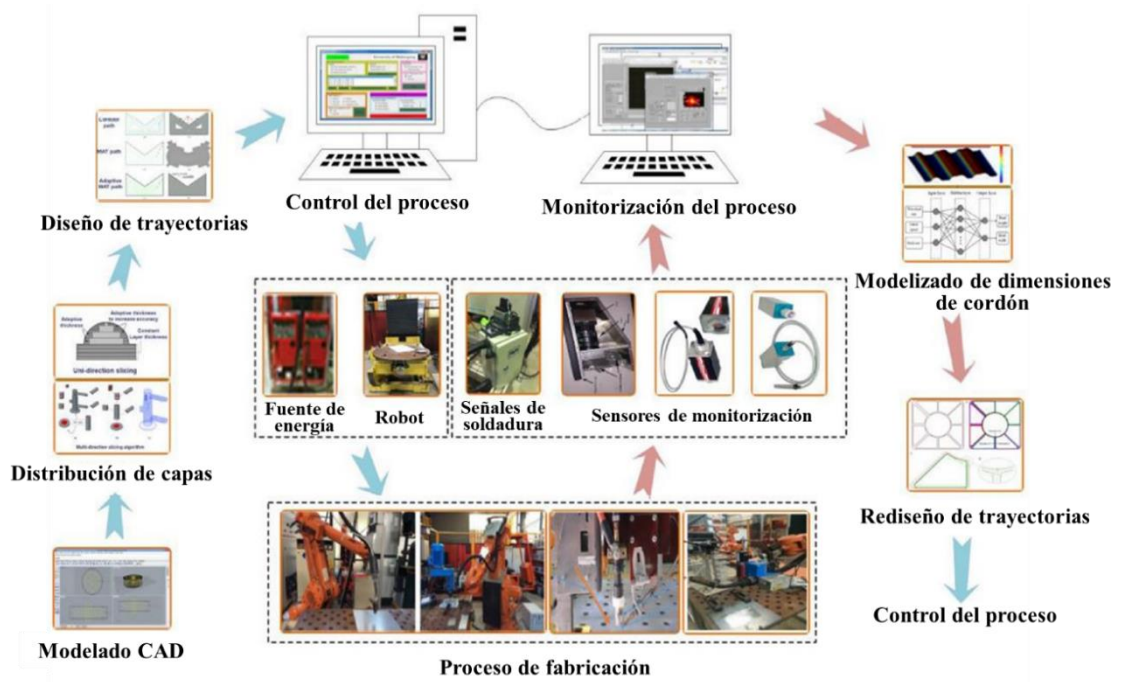


Figura II-25. Concepto del sistema WAAM integral (adaptado de [Wu, 2018-b])

CAPÍTULO III

CAPÍTULO IV

CAPÍTULO V

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. Suárez, 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. Tabernerero, 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.

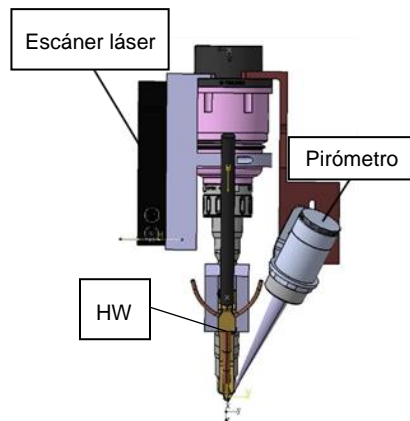


Figura VI-1. Representación de la antorcha del sistema robótico desarrollado en esta tesis con la incorporación del HW

- 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., Suárez, 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.

- [Birmingham, 2018] Birmingham, 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 Weld 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., & Evers, 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. *Industrial 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., Rafieezad, 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 additively 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 Intelligent 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.
- [SCI AKY, 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, I., & 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.